#6

ISSN 0388-9718

BULLETIN OF NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF FISHERIES ENGINEERING

No. 6　March 1985

水産工学研究所研究報告

第 6 号

昭和 60 年 3 月

LIBRARY
SEP 19 1985
National Marine Fisheries Service
2570 Dole Street
Honolulu, Hawaii

水　産　庁
水 産 工 学 研 究 所
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF
FISHERIES ENGINEERING
FISHERIES AGENCY

Digitized by the Internet Archive
in 2025

https://archive.org/details/bulletin-of-national-research-institute-of-fisheries_1985-03_6

水産工学研究所研究報告　第6号

目　次

サロマ湖の海水交流に関する研究…………………………………………………………萩野　静也…… 1

2・3の海産魚類の走流性状に関する基礎的考察…………………………安永　義暢……17
日向野純也

底層密度流先端部の水理特性に関する研究……………………………………武内　智行……27

漁港港内の水面変動予測に関する研究……………………………………………山本　正昭……89

防波堤下の鋼製桁沈床の挙動解析法に関する研究…………………………大槇　正紀… 149
坪田　幸男

高採算性沿岸漁船の基本設計用シミュレーションプログラムについて…土 屋　孟… 179
鈴木　四郎

漁船の波浪中の耐航性について（第三報）…………………………………山越　康行… 205
——向波中の抵抗増加について——
梅田　直哉
鈴木　四郎

漁船の船尾形状の改良法に関する研究……………………………………………川島　敏彦… 225

漁船機関におけるA/Cブレンド油の使用について—II …………………小田　健一… 243
——以西底曳網漁船における実績——

多目的計量魚群探知機………………………………………………………………………古澤　昌彦… 253
宮野鼻洋一

ベーリング海におけるイシイルカのサケ・マス流網への…………………畠山　良己… 267
羅網の防止に関する音響的研究（第1報）
石 井　憲
武 富　一

平面網地の流水抵抗に関する研究　III…………………………………………………大沢　要一… 289
——貫通式無結節平面網地の抗力係数と縮結量との関係——

養殖生簀の研究　II…………………………………………………………………………………大沢　要一… 297
——生簀網の容積と流速との関係について——
田原　陽三
武 富　一

釣針にかかる魚の引張力……………………………………………………………………三次　信輔… 323
井上　喜洋

BULLETIN OF
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF
FISHERIES ENGINEERING

No. 6

Contents

Seiya HAGINO
Study on Sea Water Exchange Characteristics in Lake Saroma ………………… 1

Yoshinobu YASUNAGA and Junya HIGANO
A Consideration about Rheotaxitic Behaviour of a few Species of Marine Fish…17

Tomoyuki TAKEUCHI
A Study on the Hydraulic Characteristics of the Head of Bottom-Layer Density Currents……………………………………………………………………………27

Masaaki YAMAMOTO
Study on Estimation of Wave Oscilation in Fishing Port………………………89

Seiki OHMAKI and Yukio TSUBOTA
A Study on the Analytical Procedure of Steel Beam under the Breakwater… 149

Tsutomu TSUTIYA and Shiroh SUZUKI
Simulation Program to Find the Economically Optimum Design of a Coastal Fishing Boat in Japan……………………………………………… 179

Yasuyuki YAMAKOSHI, Naoya UMEDA and Shiro SUZUKI
The Seakeeping Quality of Fishing Boats in Waves (Part 3) ………………… 205
——Resistance Increase in Head Seas——

Toshihiko KAWASHIMA
On the Method to Improve Aft Hull Form of Fishing Boats ………………… 225

Kenichi ODA
Burning of Blended Fuel on Fishing Boat Engine II ……………………………… 243
——Tow Boat Trawlers Burning Lower Quality Marine Fuel Oil on Their Engines——

Masahiko FURUSAWA and Yoichi MIYANOHANA
Multipurpose Quantitative Echo-Sounder ……………………………………… 253

Yoshimi HATAKEYAMA, Ken ISHII and Hajime TAKETOMI
Acoustic Study on the Reduction of Entanglement of Dall's Porpoise in the Gill Net in the Bering Sea (Part 1)……………………………………… 267

Yohichi OHSAWA
Studies on Resistance of Plane Net against Flow of Water III………………… 289

Yohichi OHSAWA, Yohzoh TAWARA and Hajime TAKETOMI
Studies on Behavior of Fish Cages against of Water II……………………… 297

Shinsuke MITSUGI and Yoshihiro INOUE
The Pulling Force of Fish Caught by Fishing Hook ……………………………… 323

水工研報告 6
1984 pp. 1~15

サロマ湖の海水交流に関する研究

萩野静也*

目次

1. 緒 言……1
2. 海水交換特性……1
  2.1 調査方法……1
  2.2 調査結果および考察……1
  2.3 海水交換特性……8
3. ホタテガイ浮遊幼生の分散……10
4. 結 言……14
  参考文献……14
  Summary……15

1. 緒 言

サロマ湖のように湾内が湾口部より深く，かつ閉鎖性の内湾は古くから良好な養殖漁場として広く利用されてきた。しかしその反面，湾内外の海水交換・交換は狭い湾口部を通じて行われるため，それらは不活発で，しばしば養殖生物のへい死をもたらし問題となった。一方，このような内湾では春季から夏季に密度成層が形成され，この密度成層状態が海水交換機構に重要な働きをすることが指摘されている。従ってこのような内湾の漁場環境改良を考える場合には湾口周辺部の流動環境，海水交換機構を解明する必要がある。本研究は閉鎖性の深い湾湖としてサロマ湖をとりあげ，その湖口周辺部の流動環境・交換について明らかにするとともに，ホタテガイ浮遊幼生の量変動と海水交換による分散の関係について検討したものである。

サロマ湖はオホーック海沿岸に位置し，総面積149.2 km^2，周囲91.1km．最大水深19mをもつわが国最大のかん水湖である。サロマ湖は図—1に示すように地形的にみると，キムアネップ岬と福島番屋を結ぶ線によって二つの湖盆に分けられる。サロマ湖の第1湖口（1978年以前の湖口）は西の湖盆の砂州のほぼ中央にあり，幅約270m，最大水深22m（平均水深10m）を有するが，湖内面積に比べ湖口の通水断面積が小さいため，第1湖口から遠い東部の湖盆は外海水との交流・交換が不活発で，年々この漁場は老朽化しつつあった。そこで福島番屋付近の砂州を開削し，外海水を東部湖盆水域に導入することにより，海水交流，交換の増大を図り，ホタテ・カキ・ノリなどの養殖事業を発展させようということで，新水道開削事業が行われた。そして1978年12月に第2湖口が開削された。

この研究の一部は1981～1983年まで水産庁「サロマ湖浅海漁場開発事業効果調査」の一環として行われたものをまとめたもので，調査はサロマ湖の第2湖口開削後のその周辺部の漁場環境，特に夏季成層期における外海水との海水交流・交換状況について調査・検討したものであることを付記する。

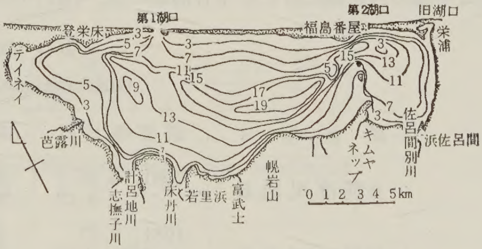


図 1 サロマ湖深浅図
Submarine topography of Lake Saroma

2. 海水交換特性

2.1 調査方法

調査はサロマ湖第2湖口周辺を中心に，1981年8月26日から9月12日までおよび1982年6月22日から7月9日までの約半月間の磁気テープ記録式流速計，水温計による流向，流速，水温，塩分の連続観測，湖内および紋別港における潮汐調査，気象調査を行った。その主な調査項目及び方法を表—1に，調査点を図—2に示す。

2.2 調査結果および考察

2.2.1 潮汐

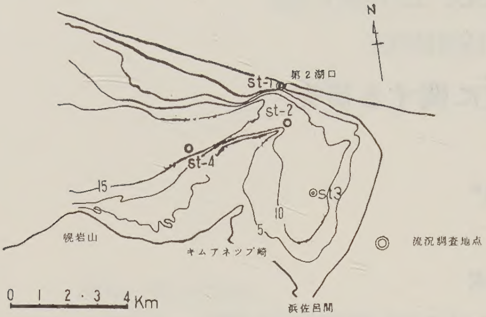


図 2　調査地点

Position of the observational stations

1981年8月27日から9月10日までの紋別港およびサロマ湖の潮候曲線を図—3の上図に，1982年6月23日から7月7日までの潮候曲線を図—3下図に示す。これらの図より大潮時の潮汐は日潮不等が顕著で，1日1回潮になっていることがわかる。しかし1981年の小潮時の潮汐は1日2回潮で，日潮不等はほとんどみられない。紋別とサロマ湖の位相の遅れは平均約2～3時間で，潮差は約20cm 程度サロマ湖の方が小さくなっている。両地区の潮汐を Darwin の方法により調和分解し，それぞれの分潮の調和定数を求めた結果は表—2の通りである。O_1，K_1，M_2 分潮が両地区とも卓越している。位相の遅れは日周潮で約3時間，半日周潮で約1.7時間である。主要4分潮の日周潮に対する半日周潮の比 $(K_1+O_1)/(M_2+S_2)$ はサロマ湖で2.5，紋別で1.6となり，両地区とも日周潮型の潮汐が卓越することがわかる。

2.2.2　風と気圧変動

紋別における1981年8月27日から9月10日，1982年6月23日から7月7日までの風速変化を図—4に示す。1981年の調査期間中の風は概ねSWの風が卓越しており，平均風速は2～3 m/sec である。しかし9月1日および低気圧の通過に伴う9月4日の風はNWおよびNEで，最大風速は約9 m/sec である。また9月9日も低気圧の通過が見られるが，この時の風はSWないしSSEで，最大風速は約9 m/sec である。

次に1981年の調査期間中の風は6月30日までは北風で平均風速は約3 m/sec，7月1日以降は南風が卓越し，平均風速は1.5m/sec である。6月28日には低気圧が通過し，最大風速約7.5m/sec の北風である。

2.2.3　水　温

1981年における各 st の水温の時間的変化を図—5に示す。第2湖口水道部（st-1，観測水深 −1.0m）の水温は，8月27日から8月31日頃までの大潮時の水温変動が大きく，一日の水温較差は5℃にも達する。9月1日から9月5日頃までの小潮時の水温変動は小さく，平均水温は約18.5℃である。さらに9月6日から9月12日頃までの大潮時の水温は小潮時と同様に変動は小さく，一日の水温較差は1℃程度である。またこの期間の平均水温は約18℃である。

表 1　調査項目及び方法

Observational items and methods

調査項目	調査年月日	調査内容	調査地点	観測機器
長期流況調査	1981. 8.26 —9.12	水温・塩分 流向・流速	st-1～st-4 4点	MT　流速計 MT　水温計
短期流況調査	1981. 8.27 上げ潮・下げ潮時	水温・塩分 流向・流速 内部静振	第2湖口周辺 20点	CM-2S流速計 サリノメータ 魚探
潮汐調査	1981. 8.26 —9.12	潮位	栄浦，富武士 三里番屋	リシャール 検潮義
気象条件調査	1981. 8.20 —9.20	気温，風，降雨量等 河川流量	浜佐呂間 紋別	
長期流況調査	1982. 6.22 —7. 9	水温・塩分 流向・流速	st-1～st-4 4点	MT　流速計 MT　水温計
短期流況調査	1982. 6.23 上げ潮・下げ潮	水温・塩分 流向・流速	第2湖口周辺 21点	
潮汐調査	1982. 6.20 —7. 8	潮位	紋別	
気象条件調査	1982. 6.10 —7.10	気温，風，降雨量等	紋別	

表2　調　和　定　数

Harmonic constant

調査年月	1981年8月				1982年6月	
調査地点	紋別港		サロマ湖		紋別港	
分潮名	振幅（CM）	遅角（度）	振幅（CM）	遅角（度）	振幅（CM）	遅角（度）
K_2	2.28	137.55	1.30	194.93	2.12	139.07
M_2	17.37	87.50	11.42	137.81	18.00	89.24
N_2	3.37	62.69	2.22	109.48	3.49	64.53
ν_2	0.66	66.02	0.43	113.29	0.68	67.85
μ_2	0.42	124.54	0.27	180.08	0.43	126.11
S_2	8.37	133.80	4.76	190.65	7.80	135.33
T_2	0.49	131.95	0.28	188.53	0.46	133.49
R_2	0.07	133.98	0.04	190.86	0.06	135.52
L_2	0.49	112.32	0.32	166.13	0.50	113.95
O_1	18.05	161.64	20.05	205.03	21.18	162.94
Q_1	3.50	152.42	3.89	195.47	4.11	152.33
P_1	7.25	178.85	6.27	222.86	6.67	182.71
M_1	1.28	170.95	1.42	214.67	1.50	173.63
J_1	1.43	189.48	1.58	233.86	1.67	194.93
K_1	21.91	180.25	18.95	224.30	20.14	184.32
M_4	0.26	326.09	0.56	158.76	0.39	221.69
MS_4	0.22	140.57	0.58	65.30	0.46	308.86

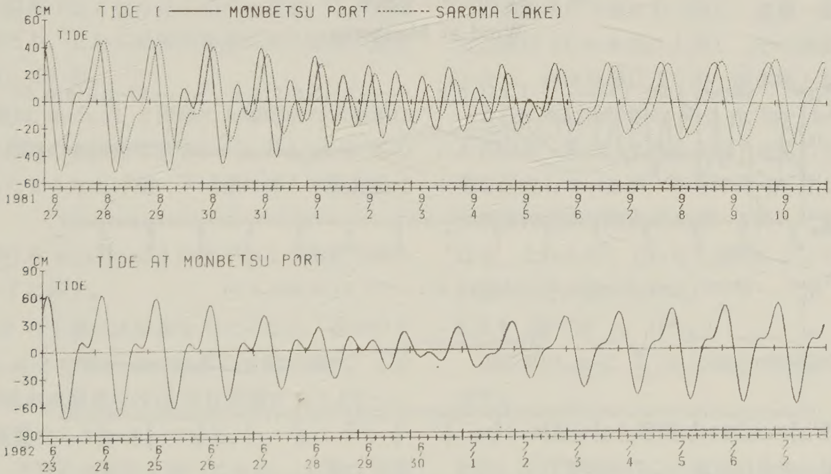


図3　潮　候　曲　線

Time changes in tide level

st-2の8月31日頃までの水温は上層（観測水深−2.5m）で17℃．下層（観測水深−9.0m）で16℃とほぼ一定の値であったが，9月1日頃を境に上，下層とも0.5℃〜1.0℃程度の水温上昇がみられる。またst-1ほどはっきりした卓越周期がみられず，その変動幅もst-1に比べ小さくなっている。そして9月5日以降は上下層の水温差がなくなり，約17.5℃の一定の水温を保っている。この9月1日頃の水温上昇および9月5日以降の上

下層の水温差減少は低気圧の通過および風の影響と考えられる。

st-3 の9月1日頃までの水温は上層（観測水深−2.5 m）で st-2 の上層水温より高く，かつ変動も大きい。下層（観測水深−9.0m）水温は st-2 の上層水温とほぼ同じで約17℃である。9月1日に下層水温は上昇し，それ以降上下層の水温差はなくなり，約17.5℃の一定値となる。

st-4 の上層（観測水深−4.0m）水温は st-3 の上層水温とほぼ等しく，前半は約19℃である。後半はいくぶん低くなり約17.5℃である。下層（観測水深−15.0m）の水温は他の st と同様に9月1日に約3℃近く上昇するが，この水温上昇は長く続かず，1日後には元の水温にもどる。しかし，9月4日から9月5日にかけて再び水温は上昇し，その後は約17.5℃の一定水温が続く。

1982年における各 st の水温の時間的変化を図−6に示す。

st-1（観測水深 −1.0m）の水温は前半の7月1日頃まで13℃から11℃程度で変動も小さいのに対し，後半は17℃〜13℃と高温となり，変動も大きくなっている。この傾向は st-2 の表層（観測水深−2.5m）についても同じである。これに対し，st-2 の下層（観測水深−9.0m）の水温はほぼ13℃前後で安定している。

st-3 における上層（観測水深−2.5m），中層（観測水深−4.0m），下層（観測水深 −8.0m）の水温変動は st-2 の場合とほぼ同じである。すなわち上層の水温は

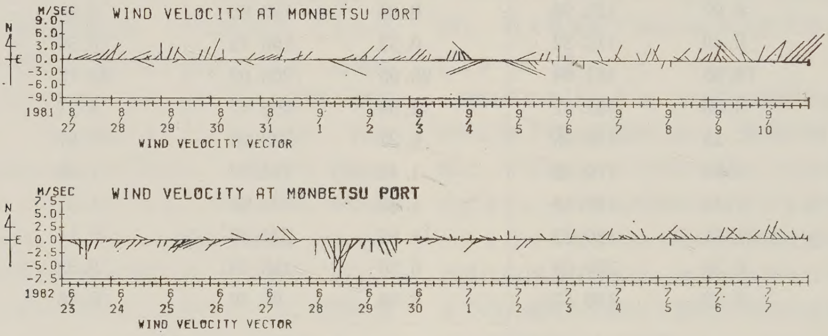


図 4　紋別における風速ベクトル

Wind at Monbetsu

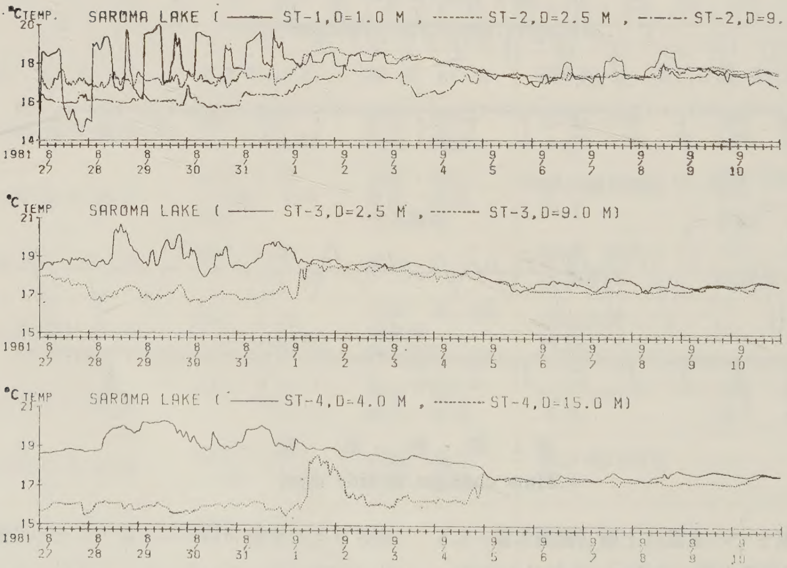


図 5　水温の時間的変化（1981年）

Time changes in temperature (1981)

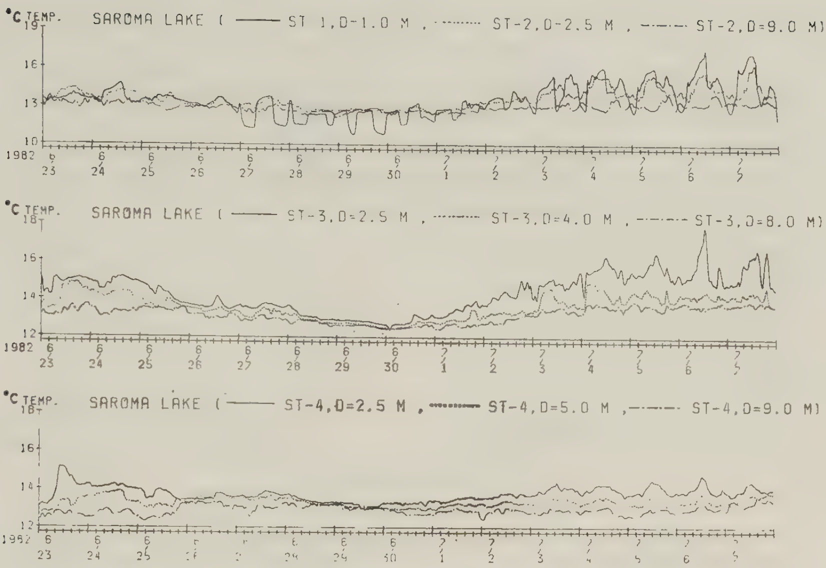


図 6 水温の時間的変化（1982年）
Time changes in temperature (1982)

7月1日頃までほぼ15℃から13℃位まで漸減しており，1日の水温変動も小さいのに対し，後半は高温となり，1日の水温変動も大きい。しかし，下層はほぼ13℃前後で，水温変動も小さい。6月28日から6月30日まで，上，下層の水温差はなくなりほぼ13℃となる。この期間は小潮時にあたり，しかも低気圧通過に伴う強風の連吹の期間と一致している。

st-4 の水温は st-2，3 と同様に大潮時頃の水温差は大きいが，小潮時の水温差は小さい。しかし st-2，3 の上層でみられたような上げ潮，下げ潮に伴う水温変動は小さい。

1982年における st-1 と st-2 の水平および鉛直方向の水温差を図－7に示す。

st-1 と st-2 の上層の水温差をみてみると，前半の7月1日までは st-2 の方が st-1 に較べ水温が高い。しかし7月2日以降の水温差はほぼ半日周期で +1.5℃～−1.5℃の水温変動をくりかえしている。

st-2 の上，下層の水温差を調べてみる。上層の水温は常に下層の水温より高いが，その変動の様子は潮日によって違う。すなわち大潮日の頃は上げ潮，下げ潮による水温差変動は大きく，その傾向は7月3日以降の大潮日に顕著である。それに対し6月28日から7月2日頃までの小潮の時の水温差は小さくかつ卓越した変動がみられない。以上より水温差の変動，言いかえれば湖内水と外海の海水交換には大潮，小潮という潮時の他に，風が大きく影響していると考えられる。

st-2 および st-3 の Iso-therm depth を図－8に示す。1981年の st-2 の Iso-pleth をみると，9月1日までの水温は成層構造を示すが，9月2日には上層の17.5℃の高温水が下層まで下降し，全層一様になる。9月3日以降17.5℃の水塊は上昇し，その後成層を形成することなく，ほぼ全層17.5℃の一様水温となる。

これに対し1982年の st-3 の Iso-pleth をみてみると6月23日～26日，7月3日～7日頃の大潮時の水温は成層を形成しているが，6月27日～7月1日頃の小潮時の水温は13℃の下層水が上層へ上昇して来て，全層均一となる。これらのことからも潮時によって海水交換の機構が違うことが認められる。

2.2.4 塩　分

1982年の st-1，2，4 の塩分の時間的変化を図－9に示す。

st-1 の塩分は上げ潮には約33.5‰程度の高塩分であるが，下げ潮時にはこの塩分が急激に減少する。これは上げ潮，下げ潮時の流出入機構の違いの他に，干潮時の流速計の設置水深がごく表層にくるためであろうと思われる。しかし流出入時の塩分変動の傾向は示している。

st-2 の下層の塩分は測定期間中ほぼ33‰程度であり，st-1 の上げ潮時の塩分に近い値である。上層の塩分は上げ潮時には下層とほぼ等しく，約32.5‰であるが，下げ潮時には32‰程度に減少する。また1日周期の変動が

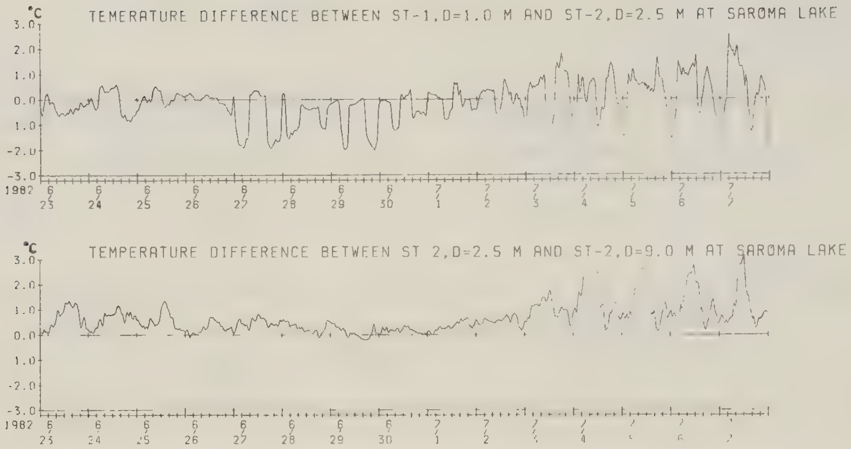


図 7 水温差の時間的変化
Time changes in temperature difference

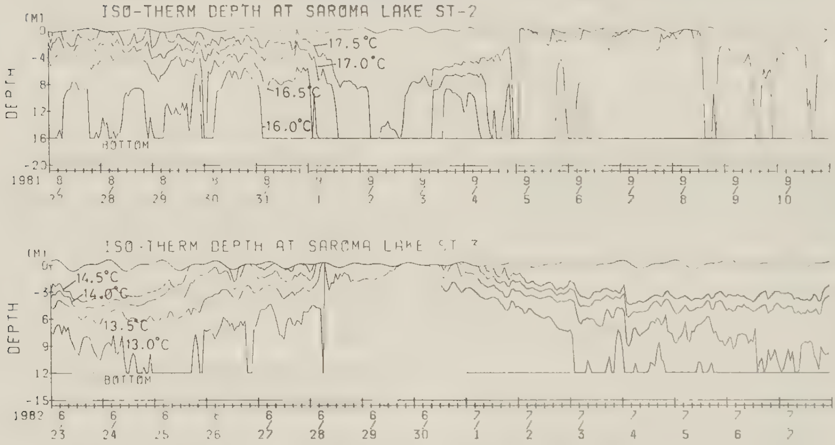


図 8 水温の等値線
Variations of isotherm depths

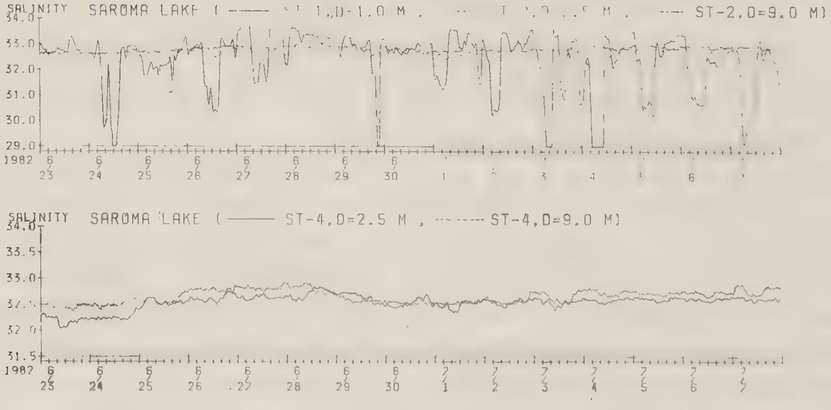


図 9 塩分の時間的変化
Time changes in Salinity

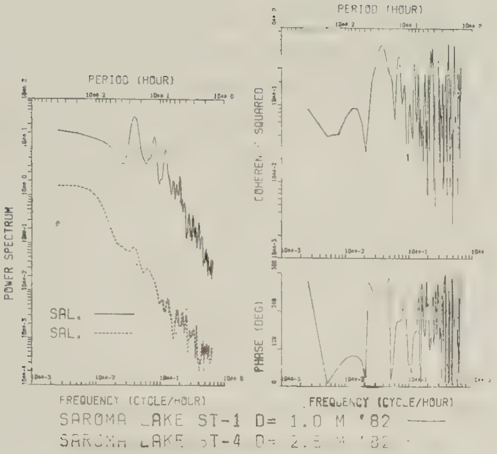


図 10 塩分のスペクトル

Spectrum, coherence and phase difference of Salinity

認められる。

st-4 の塩分は上層，下層の塩分差は非常に小さい，また調査期間前半の6月26日頃までは塩分に若干の変動が見られるが，その後はほとんど変動せず，32.7‰程度の一定の値である。

st-1 と st-4 の上層の spectrum, coherence, phase を図―10に示す。この図より st-1 と st-4 の塩分は異質なものであることがわかる。このことより第2湖口の影響域はキムヤネップと福島番屋を結ぶ湖奥湖盆であると考えられる。

2.2.5 流向・流速

st-1 は第2湖口水道部であるため流速が速く，かつ流出時には湖内のアマモ類が流出し，流速計にからまりつくため充分満足すべき流向，流速は得られなかった。ただ1981年8月31日までの短期間の，しかもほとんど流入時のみの流速が得られた。この時の最大流入流速は約1.8m/sec である。そこで第2湖口の流速は紋別港とサロマ湖内の潮位差より推算する。

サロマ湖第2湖口のように二つの水域を結ぶ狭さくされた水路の流速は一般に次式で計算される。

$$u=\pm C\sqrt{g|h-h'|} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで u：断面平均流速，C：流量係数，h, h'：紋別，サロマ湖内の水位，g：重力加速度

流量係数 C は湖口部の水理特性を表わすもので，サロマ湖第2湖口のように単純な形状の場合は実用上ほぼ次式で計算できる。

$$C=\left[1.4+0.02\frac{\ell}{d^{4/3}}\right]^{-1/2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

ここで d：湖口部水深，ℓ：湖口部の長さ

サロマ湖第2湖口の d，ℓ はそれぞれ $d=5$ m，$\ell=300$ m となり，これらの値を用いて(2)式により C を求めると $C=0.69$ となる。h，h' は紋別港およびサロマ湖湖内の潮汐の調和定数（表―2）を合成して得られた水位を用いた。ただし，サロマ湖の平均水面は紋別港のそれと同じとする。そのような方法で求めた第2湖口部の流速は図―11のとおりである。この図で縦軸正の値は流入流速である。また第2湖口部での実側値を点線で示す。第2湖口部の計算流速と実測流速を較べると転流時の時間に若干のずれがみられるがほぼ一致している。最大流速

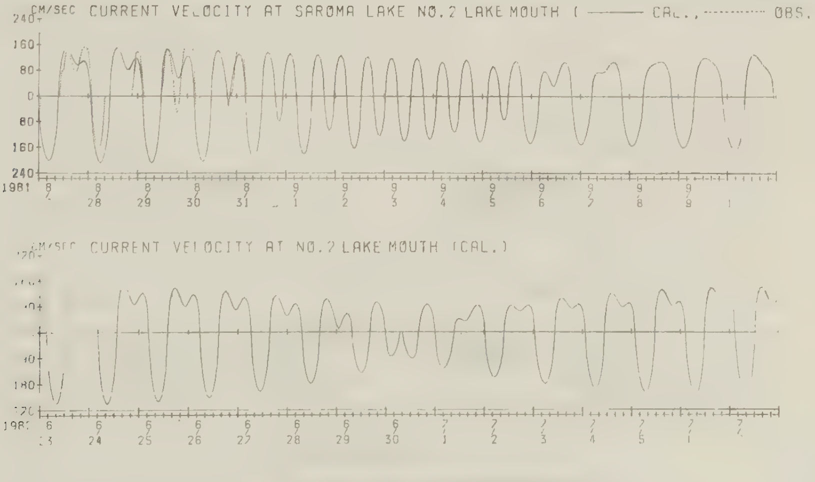


図 11 第2湖口部の流速の時間的変化

Time changes in current velocity at the new water channel

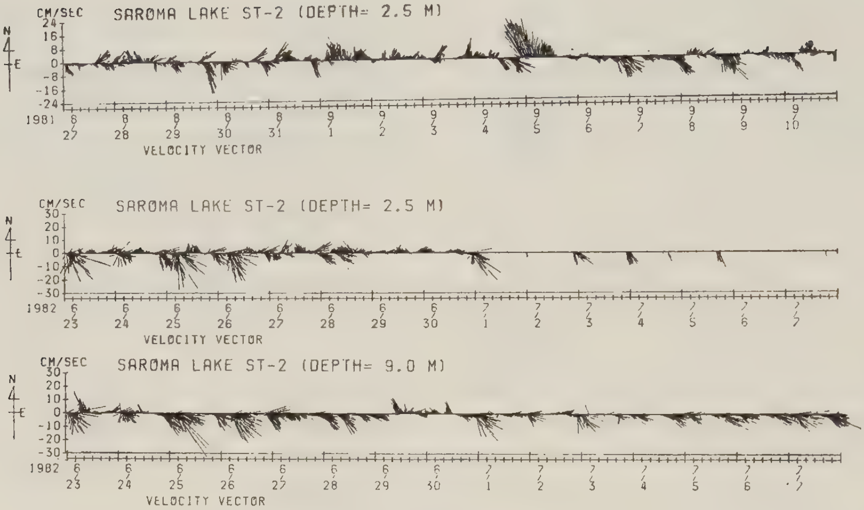


図 12 St-2 における流速ベクトル
Current velocity at Stn. 2

は計算値の方がいくぶん小さいが，計算値の方は断面平均流速であることを考えれば，ほぼ妥当な値と考えることが出来る。すなわち第2湖口の流速はほぼ内外の水位差で表わされる。流出時の最大流速は流入時のそれよりも大きく，1981年は約2 m/sec，1982年は約2.5 m/secにも達する。

st-2 における流速ベクトルを図―12に示す。1981年の st-2 の上層流速は調査期間の前半はＮＥ～ＮＷの流れが卓越し，後半はＳＥの流れが卓越する。8月29日，9月4日～5日，9月9日に速い流速がみられるが，これらはいずれも低気圧の通過時に当たり，風の影響と考えられる。1982年の st-2 の上層，下層の流れは高い相関を持ってはいるが，概して下層は流入方向（ＳＥ方向）の流れが卓越するのに対し，上層は流出方向（Ｎ方向）の流れも認められる。

2.3 海水交換特性

2.3.1 海水交換機構

以上の調査結果をもとにサロマ湖における海水交換特性を総観的に推定すると図―13のようになる。

すなわち大潮流入時の第2湖口流速は大きく，従って tidal excursion も大きくなるため，外海水はプルーム状に流入してくる。またこのプルームの密度は湖内水より大きいため，湖口より約500 m付近で内部落下し，ほ

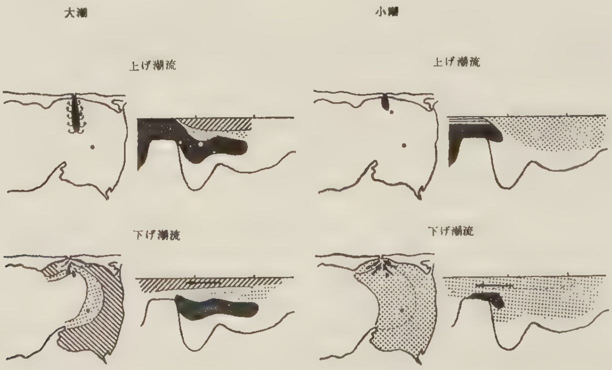


図 13 海水交換特性概念図
Schematic view of sea water exchange in the eastern basin of Lake Saroma

ぼ中層付近を進行する。この際周辺の湖内水を激しく連行し，混合水となる。流出時には表層付近の高温低かんな湖内水がポテンシャル流に近い状態で流出する。そのため流入時に潜流した混合外海水は中層に trap された形で残留し，徐々に上層水と混合する。

小潮時の海水交換特性も基本的に大潮時と同じであるが，湖口流速が小さいため，プルームの形成は湾口部周辺のみとなり，湖内中層への定常的な外海水の供給は少なくなる。そのため鉛直密度勾配も小さく，低気圧などの通過に伴う強風の連吹により，上下層の鉛直混合が活発に起る。そしてその混合水が外海へ流出する。なお大潮時，小潮時で塩分と湖口流速の位相関係は違い，ほぼ大潮時には松田1) の言う E-type，小潮時には R-type に近い形となっている。

次に流入水の湖口部から st-2 間の内部落下に伴う連行について検討する。いま上層密度 ρ_1，下層密度 ρ_2 とする二層密度成層をなす境界面を密度 ρ_0 の外海水が進入する場合，外海水の密度は下層密度とほぼ等しいと仮定すれば，外海水は上層水のみを連行し，st-2 で密度 ρ_b に変化する。その時単位幅当りの流量および密度の連続式は次式のようになる。

$$q_0+q_1=q_b \cdots\cdots(3)$$

$$\rho_0 q_0+\rho_1 q_1=\rho_b q_b \cdots\cdots(4)$$

ここで q_0，q_b は湖口および st-2 の単位幅当りの流量，q_1 は湾口〜st-2 間での連行流量，ρ_1 は上層密度で st-2 の上層密度とほぼ等しいと仮定する。湖口 〜 st-2 間の連行率を q_b/q_0 と定義すれば(3)，(4)式よりその値は次のように表わされる。

$$\frac{q_b}{q_0}=\frac{\rho_0-\rho_1}{\rho_b-\rho_1} \cdots\cdots(5)$$

その連行率の時間変化を図—14に示す。この図より小潮時の連行率は大潮時のそれより大きくなっている。これは小潮時の上下層の密度差が小さいため，相対的に連行率は大きくなったものと考えられる。大潮時の連行率はほぼ1に近いが，6月24日，26日，7月4日，5日頃に約4程度の大きな連行率を示している。この時間帯は上げ潮から下げ潮に転流する直前にみられる。内部跳水と上層水の連行率は（6）式ように与えられる。（中村2)）

$$\left.\begin{aligned}
&\eta=\frac{\xi^2-1}{\dfrac{2\xi}{K}+\xi+1}=\frac{q_1}{q_0}\\
&\xi=\frac{1}{2}(-1+\sqrt{1+8F^2r})\\
&Fr=\frac{u_1}{\sqrt{\varepsilon g h_1}}\\
&\varepsilon=\frac{\rho_0-\rho_1}{\rho_0}
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots(6)$$

ここで η：連行率，Fr：内部フルード数，h_1：湖口部水

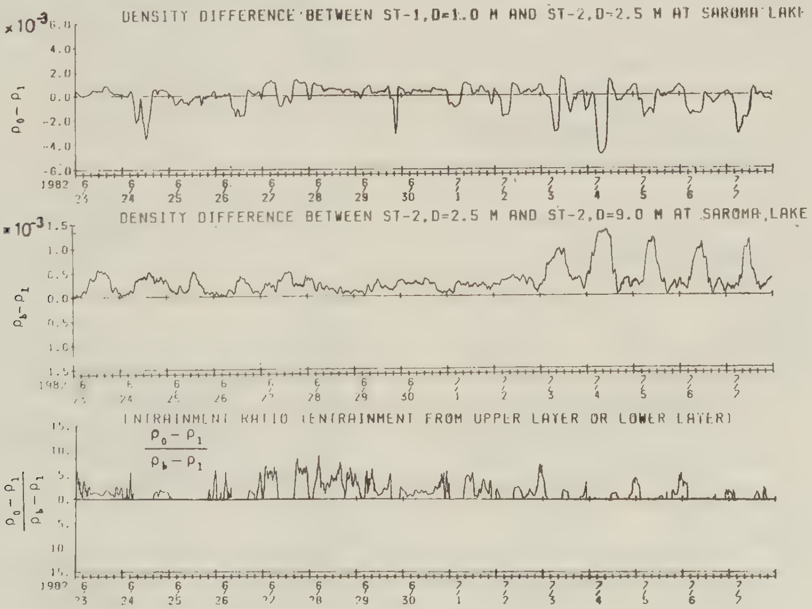


図 14　密度偏差と連行率

Density difference and entraiment ratio

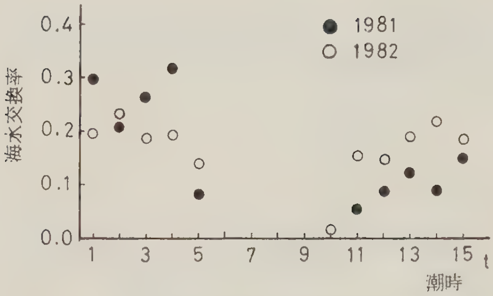


図 15　海水交換率

Sea water exchange ratio at new water channel

深，u_1：湖口部平均流速，K：Ellison-Turner による連行係数

この理論式をサロマ湖に適用してみる。図—11より大潮時，小潮時の平均流速はそれぞれ $u_1=1.0$，0.7m/sec，また図—13より大潮時小潮時の ε はそれぞれ10^{-3}，5×10^{-4} となる。これらの値を用いて(6)式により連行率を計算すると次のようになる。

$Fr=4.5$

$\xi=5.9$

$K=0.05$

$\eta=0.15$

従って図—14で示した連行率は

$$\frac{q_b}{q_0}=1+\frac{q_1}{q_0}=1+\eta=1.15$$

となり，この値はほぼこの理論式を満足する。

一潮（25時間）当りの海水交換率を湖口での塩分 flux より推定すると図—15の通りである。ここで海水交換率は一潮当りの湖内の残留塩分量の比で求めた。これより交換率の値はバラツキが大きいが，大潮時で0.1〜0.2の間にある。

2.3.2　第2湖口開削前後の海水交流の比較

第2湖口開削前後の海水交換の特性を潮時別に計算すると図—16のようになる3)。これらの値はほぼ観測値と一致している。第2湖口開削後の第1湖口，第2湖口の1潮当り（12時間）の交流量比は約92%，8%である。

3.　ホタテガイ浮遊幼生の分散

サロマ湖内ではホタテガイ，カキ，ノリなどの養殖が行われている。このうち生産量，漁場の利用面積からみると大部分はホタテガイ養殖であり，その大半が天然採苗によっている。そのためホタテガイ浮遊幼生の量変動や採苗成績はサロマ湖の養殖漁業にとって重要な意味をもっている。このホタテガイ浮遊幼生の量変動は産卵

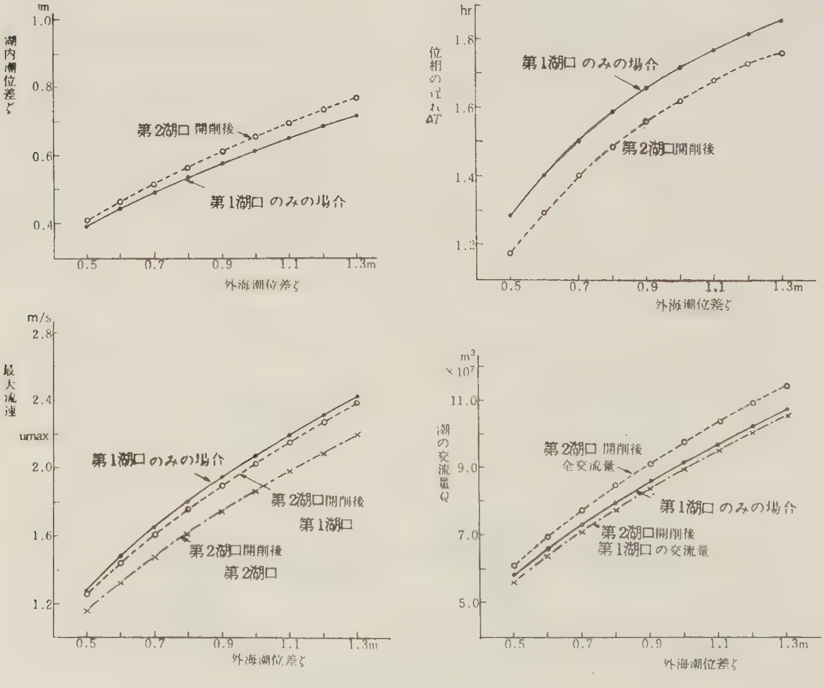


図 16　第2湖口開削前後の海水交流特性

Sea water exchange charactristics for before and after of improvement work

量，水温，水質などによっても大きく変るが，大局的には浮遊期間と湖内外の海水交換に関係している。そこでサロマ湖におけるホタテガイ浮遊幼生の量変動と海水交換による分散の関係を1969～70年，1980～81年の調査データをもとに検討した。サロマ湖におけるホタテガイ浮遊幼生の密度分布は湖東部（B海域）で高く，湖西部（A海域）で希薄である。そこで図—17に示すようにサロマ湖をA，B両海域に区分し，浮遊幼生密度の時間変化を（7），（8）式で与えた。（中村[4)]，1978）

$$V_A\frac{dS_A}{dt}=(S_B-S_A)Q-KS_AV_A-(S_A-S_0)Q_0 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

$$V_B\frac{dS_B}{dt}=(S_A-S_A)Q-KS_BV_B-(S_B-S_0)Q_1 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

ここで V_A，V_B：A，B海域の平均水容積，Q_0，Q_1，Q：A—外海，B—外海，A—B海域間の海水交換量，S_0，S_A，S_B：外海，A，B海域の浮遊幼生密度，K：自然減耗係数

すなわち，単位時間（12時間）に発生した浮遊幼生の密度の時間変化は隣接する海域からの海水交換による流出入量と死亡などによる減耗量で表わされる。

そしてA，B海域の浮遊幼生の発生密度を初期条件として与え，（7），（8）式を連立で解けば，t時間後の浮遊幼生密度は（9），（10）式のようになる。

$$S_A=D\cdot Ae^{-(I_0-\gamma_0)t}+C\cdot Be^{-(I_0+\gamma_0)t}+ES_0\cdots(9)$$

$$S_A=Ae^{-(I_0-\gamma_0)t}+Be^{-(I_0+\gamma_0)t}+\frac{\alpha}{\gamma}S_0 \quad\cdots\cdots(10)$$

ここで

$$I_0=\frac{1}{2}(\alpha_A+\alpha_A+\alpha_0+\alpha_1+2K)$$

$$\gamma=\alpha+(\alpha_A+\alpha_A+\alpha_0+K)K$$

$$\gamma_0=\sqrt{I_0^2-\gamma}$$

$$\alpha=\alpha_0\alpha_B+\alpha_1(\alpha_A+\alpha_0+K)$$

$$A=\frac{\alpha_B}{2\gamma_0}\left[P_A-CP_B+\frac{1}{\alpha_A}\left\{(I_0+\gamma_0)(1-\frac{\alpha}{\gamma})-K\right\}S_0\right]$$

$$B=-\frac{\alpha_B}{2\gamma_0}\left[P_A-D\cdot P_B+\frac{1}{\alpha_B}\left\{(I_0-\gamma_0)(1-\frac{\alpha}{\gamma})-K\right\}S_0\right]$$

$$C=1-\frac{I_0+\gamma_0-K-\alpha_1}{\alpha_B}$$

$$D=1-\frac{I_0-\gamma_0-K-\alpha_1}{\alpha_B}$$

$$E=\frac{1}{\alpha_B}\left\{(\alpha_B+\alpha_1+K)\frac{\alpha}{\gamma}-\alpha_1\right\}$$

$$\alpha_A=\frac{Q}{V_A},\ \alpha_B=\frac{Q}{V_B},\ \alpha_0=\frac{Q_0}{V_A},\ \alpha_1=\frac{Q_1}{V_B}$$

ここで P_A，P_B：A，B海域の単位時間当りの幼生の発生密度，

さらに，（9），（10）式の密度変化量を産卵期間 t_h，浮遊期間 t_f の大小で区別し，時間積分することにより，A，B海域の浮遊幼生現存量 Y_A，Y_B が次式のように求められる。

i）$t_h \geqq t_f$ の場合

① $t_i \leqq t_f$

$$Y_A=D\cdot A\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0-\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)e^{-(I_0-\gamma_0)t_i}\right\}$$
$$+C\cdot B\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0+\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)e^{-(I_0+\gamma_0)t_i}\right\}$$
$$+ES_0(t_i+1)$$
$$Y_B=A\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0-\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)e^{-(I_0-\gamma_0)t_i}\right\}$$
$$+B\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0+\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)e^{-(I_0+\gamma_0)t_i}\right\}$$
$$+\frac{\alpha}{\gamma}S_0(t_i+1) \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

② $t_f < t_i \leqq t_h$

$$Y_A=D\cdot A\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0-\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)e^{-(I_0-\gamma_0)t_f}\right\}$$
$$+C\cdot B\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0+\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)e^{-(I_0+\gamma_0)t_f}\right\}$$
$$+ES_0(t_f+1)$$
$$Y_B=A\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0-\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)e^{-(I_0-\gamma_0)t_f}\right\}$$

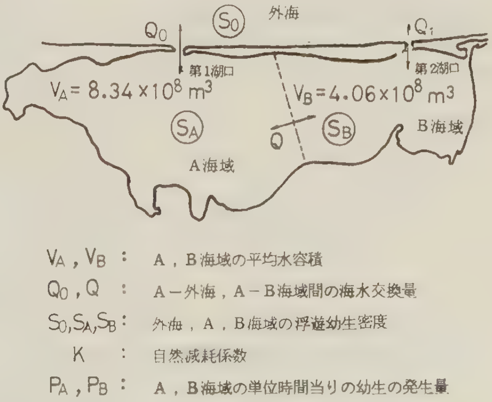

Q0
S0
外海
Q1
第1湖口
第2湖口
VA= 8.34×10^8 m^3
VB=4.06×10^8 m^3
SA
SB
Q
B海域
A海域
VA，VB：A，B海域の平均水容積
Q0，Q：A－外海，A－B海域間の海水交換量
S0,SA,SB：外海，A，B海域の浮遊幼生密度
K：自然減耗係数
PA，PB：A，B海域の単位時間当りの幼生の発生量

図 17　浮遊幼生分散の計算領域
Calculation model of Lake Saroma

$$+B\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{I_0+\gamma_0}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)e^{-(I_0+\gamma_0)t_f}\right\}$$

$$+\frac{\alpha}{\gamma}S_0(t_f+1)$$

……………………(12)

③ $t_h<t_i\leqq t_h+t_f$

$$Y_A=D\cdot A\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0-\gamma_0)t_f}-e^{-(I_0-\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+C\cdot B\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0+\gamma_0)t_f}-e^{-(I_0+\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+ES_0(t_f+t_h-t_i+1)$$

$$Y_B=A\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0-\gamma_0)t_f}-e^{-(I_0-\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+B\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0+\gamma_0)t_f}-e^{-(I_0+\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+\frac{\alpha}{\gamma}S_0(t_f+t_h-t_i+1)$$

……………………(13)

④ $t_i>t_h+t_f$

$$\left.\begin{aligned}Y_A&=S_0\\Y_B&=S_0\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

ii) $t_f>t_h$ の場合

① $t_i\leqq t_h$

(11)式に同じ

② $t_h<t_i\leqq t_f$

$$Y_A=D\cdot A\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0-\gamma_0)t_i}-e^{-(I_0-\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+C\cdot B\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0+\gamma_0)t_i}-e^{-(I_0+\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+ES_0(t_h+1)$$

$$Y_B=A\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0-\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0-\gamma_0)t_i}-e^{-(I_0-\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+B\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{I_0+\gamma_0}\right)\left\{e^{-(I_0+\gamma_0)t_i}-e^{-(I_0+\gamma_0)(t_i-t_h-1)}\right\}+\frac{\alpha}{\gamma}S_0(t_h+1)$$

……………………(15)

③ $t_f<t_i\leqq t_f+t_h$

(13)式に同じ

④ $t_i>t_f+t_h$

(14)式に同じ

表－3は1969～70，1980～81年の産卵期間，浮遊期間およびA，B海域の浮遊幼生密度の調査データである[5)]。これによると1969年，1981年の浮遊期間は低水温であったため1970，1980年の約2倍となっている。各海域間の交換率は海水交換，交流量調査結果を使い，表－3のように決めた。単位時間当りの幼生発生密度および減耗係数は次のように求めた。すなわち，1970年については浮遊幼生調査データが2組あるので(11)式にそれらのデータを代入して逆に発生密度および減耗係数を求めた。1969年については1970年と同様の方法がとれないので，初期発生密度は1969，1970年の総放卵量の比に1970年の初期発生密度をかけて求めた。また減耗係数は(12)式に種々の減耗係数値を与え，現地調査幼生密度と一致するものを検索して求めた。1980，81年については減耗係数値を0とし，それぞれ(13)，(11)式に浮遊幼生現存量データを代入して，幼生発生密度を求めた。それらの結果は表－3の通りである。以上の計算条件を用いて計算した浮遊幼生密度の時間的変化は図－18のとおりである。横軸は産卵開始からの日数，○印はある時間に発生した浮遊幼生の時間変化で，縦軸左側の値である。×印は現存浮遊幼生の時間変化で，縦軸右側の値である。いずれの曲線も実線はA海域，点線はB海域である。なお，ある時間に発生した浮遊幼生はその浮遊期間を過ぎるとその時点で浮遊していた幼生はすべて付着し，浮遊幼生密度は0となるとした。

この図より，ある時間に発生した浮遊幼生の浮遊期間を過ぎた時点の密度は1969年は0.0126個/m^{3}で，1970年は0.172個/m^{3}となり，1970年は1969年の約13.6倍付着していることがわかる。これは，1969年の浮遊期間が

表 3　浮遊幼生密度と計算条件

Data of juvenile density and calculative conditions

年	産卵期間	浮遊期間	浮遊幼生数		調査月日	産卵開始日よりの日数	計算条件	
			A海域 /m³	B海域 /m³			初期発生密度 減耗係数	交換率
1969	26　日	56　日	15	23	6月23日	37　日	$P_A=$ 1.60個/m³ $P_B=$13.18個/m³ $K=$ 0.04	$\alpha_A=0.058$ $\alpha_B=0.028$ $\alpha_0=0.086$ $\alpha_1=0.0$
1970	35　日	30　日	41	172	6月12日	14　日	$P_A=$ 2.68 $P_B=$22.06 $K=$ 0.0235	
			17	212	6月18日	20　日		
1980	28　日	27　日	1345	1859	6月20日	21　日	$P_A=$261.56 $P_B=$2336.71 $K=$0.0	$\alpha_A=0.023$ $\alpha_B=0.062$ $\alpha_0=0.085$ $\alpha_1=0.072$
			675	993	6月25日	26　日		
1981	21　日	52　日	178	272	6月11日	10　日	$P_A=$19.46 $P_B=$42.17 $K=$0.0	
			332	578	6月21日	20　日		

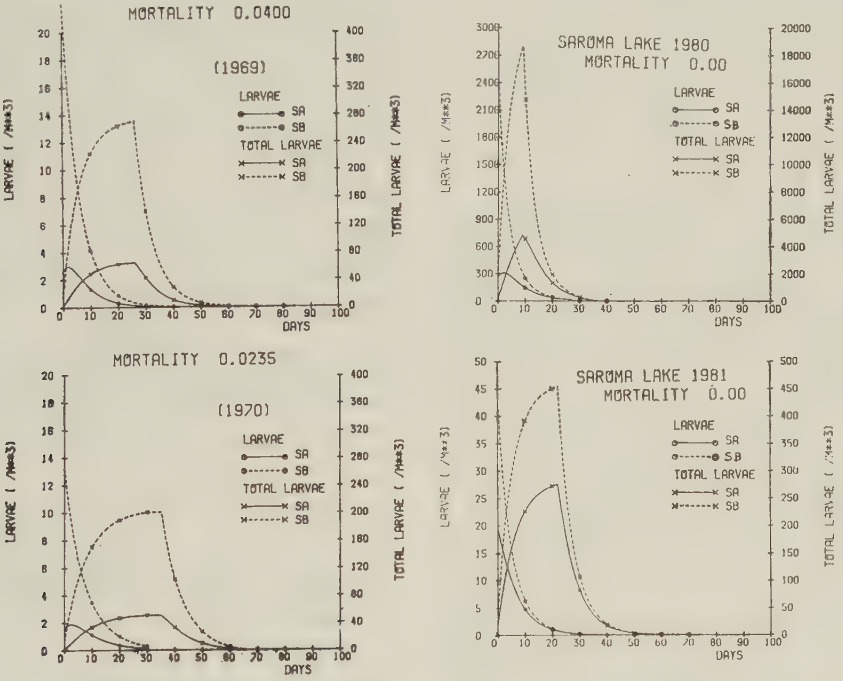


図 18　浮遊幼生密度の時間的変化

Time change of the floating stage juvenile

1970年より長く，かつ減耗係数が大きいためである。同様に1980年の場合は 11.5 個/m³，1981 年は 0.003個/m³ となり，1980年の方が約3800倍も付着量が多い。また，開削前後で比較すると開削後は浮遊幼生量は多くなったが，分散も大きくなり，1981年のように付着する量が小さい年もみられる。

次に1969，70年の産卵開始日から各年の調査日までの浮遊幼生の収支を図―19に示す。この図で現存量は調査

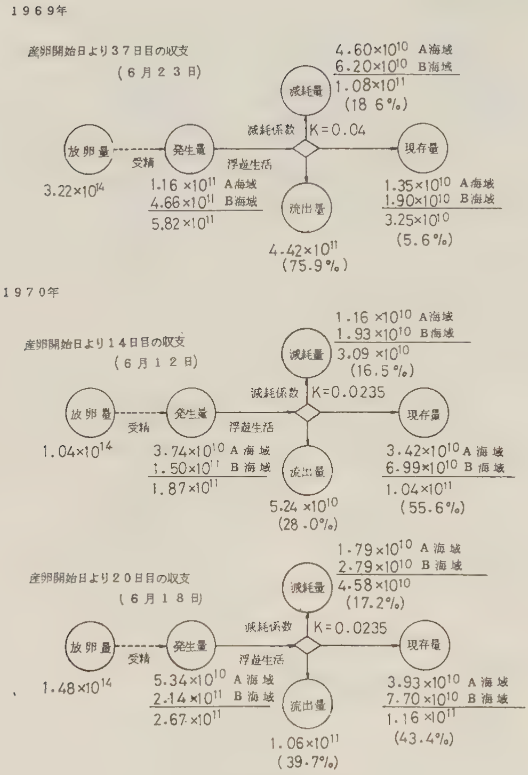

1969年
産卵開始日より37日目の収支
（6月23日）
放卵量
3.22×10¹⁴
受精
発生量
1.16×10¹¹ A海域
4.66×10¹¹ B海域
5.82×10¹¹
浮遊生活
減耗係数 K=0.04
減耗量
4.60×10¹⁰ A海域
6.20×10¹⁰ B海域
1.08×10¹¹
(18.6%)
流出量
4.42×10¹¹
(75.9%)
現存量
1.35×10¹⁰ A海域
1.90×10¹⁰ B海域
3.25×10¹⁰
(5.6%)
1970年
産卵開始日より14日目の収支
（6月12日）
放卵量
1.04×10¹⁴
受精
発生量
3.74×10¹⁰ A海域
1.50×10¹¹ B海域
1.87×10¹¹
浮遊生活
減耗係数 K=0.0235
減耗量
1.16×10¹⁰ A海域
1.93×10¹⁰ B海域
3.09×10¹⁰
(16.5%)
流出量
5.24×10¹⁰
(28.0%)
現存量
3.42×10¹⁰ A海域
6.99×10¹⁰ B海域
1.04×10¹¹
(55.6%)
産卵開始日より20日目の収支
（6月18日）
放卵量
1.48×10¹⁴
受精
発生量
5.34×10¹⁰ A海域
2.14×10¹¹ B海域
2.67×10¹¹
浮遊生活
減耗係数 K=0.0235
減耗量
1.79×10¹⁰ A海域
2.79×10¹⁰ B海域
4.58×10¹⁰
(17.2%)
流出量
1.06×10¹¹
(39.7%)
現存量
3.93×10¹⁰ A海域
7.70×10¹⁰ B海域
1.16×10¹¹
(43.4%)

図 19 浮遊幼生の収支

Balance of the floating stage juvenile

日時点での浮遊幼生量で，各海域の幼生密度と水容積の積で表わされる。流出量はA海域から外海へ流出した量で，産卵開始日から調査日までのサロ湖全域での総発生浮遊幼生量（発生量）から減耗係数0の場合の調査日時点の全域の現存量を差し引いた値である。また減耗量は各海域の減耗係数0の現存量より減耗係数Kの現存量の差である。（ ）内の比率は発生量に対する値である。1969年の産卵開始日から37日目の発生量に対する死亡減耗量，外海への流出量，現存量の比率はそれぞれ18.6，75.9，5.6％，それに対して1970年の産卵開始日から14日目のそれぞれの比率は16.5，28.0，55.6％，20日目のそれぞれの比率は17.2，39.7，43.4％であった。浮遊幼生発生量は1969年の方が多いにもかかわらず，浮遊期間が1969年の方が1970年より約2倍長かったために，外海への流出量が多くなり，相対的に現存量が小さくなったものと考えられる。⁶⁾

4. 結　言

湖口部に sill を有する閉鎖性の湾湖としてサロマ湖をとりあげ，夏季成層期における第2湖口周辺域の流動環境，交換について調査した。そしていくつかの興味ある現象がわかった。その結果を要約すると以下の通りである。

①第2湖口部の水温，塩分変動は大潮時に大きく，小潮時に小さい。

②湖内の水温，塩分の変動には大潮，小潮の潮時の影響の他に風が大きく関係している。

③　第2湖口の流速はほぼ外海と湖内の水位差で計算できる。

④第2湖口周辺部の海水交換機構は流入時と流出時で違いがある。すなわち流入外海水は上層水を連行しながらプルーム状に中層へ潜入し，トラップされる。流出時は上層水がポテンシャル流として流出する。また，風も海水交換に寄与している。

⑤第2湖口の海水交換率は約0.1～0.2である。

⑥第2湖口開削後，ホタテガイ浮遊幼生量は多くなったが，海水交換率が増大したため，浮遊幼生の分散も大きくなった。従って浮遊期間が長い年は付着量が小さくなる傾向にある。

今後に残された問題としては湖口周辺部における密度流の挙動と連行機構を明確にする必要がある。

謝辞：この調査に当って北海道栽培漁業振興公社故谷藤康造主任技師はじめ公社の皆様，サロマ湖養殖組合の皆様，水産工学研究所 杜多哲技官（現養殖研究所），武内智行技官には御協力をいただいた。また北海道栽培漁業総合センター丸邦義博士には，ホタテガイ浮遊幼生のデータ提供および助言をいただいた。ここに記して関係諸氏に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

1) Yoshihiro Mazda (1984): Water Exchange and Material Exchange through a Strait due to Tidal Flow, J. Oceanogr. Soc. Japan, vol 40, No. 1, pp 19—28

2) 中村充（1979）：水産土木学—漁場造成・海洋環境エンジニアリング，工業時事通信社，pp 364—371

3) 萩野静也（1980）：閉鎖性湾の海水交流，水産土木事例と計算法（Ⅰ），日本水産資源保護協会，pp 34—44

4) 中村充（1978）：貝類増殖に関する工学的研究，農土試報17号，pp 41—54

5) 北海道栽培漁業振興公社（1982）：サロマ湖環境調査報告書，pp 68—99

6) 萩野静也・丸邦義（1983）：サロマ湖におけるホタテガイ浮遊幼生の分散について，日水学会秋季大会講演要旨集，pp 114

Study on Sea Water Exchange Characteristics in Lake Saroma

By

Seiya HAGINO

Summary

The mechanism of sea water exchange and variation of oceanographic conditions were investigated in eastern basin of Lake Saroma in 1980 and 1981, in the summer periods when the sea water is stratified.

The results were as follows:

(1) Water temperature and salinity vary with tide stages such as spring tides and neap tides, and furthermore, are influenced by wind stress.

(2) The current velocity in the short-cut new water channel can be estimated by water level difference between the lake and the open sea.

(3) The mechanism of sea water exchange in the vicinity of the new water channel is distinguished between flood current period and ebb current period; open sea water flowing into the lake during flood period intrudes under middle layer, and entrains the upper layer water. In the following ebb period, the less dense water in the upper layer uniformly flows out of the lake. And, wind stress plays an important role in the sea water exchange.

(4) Sea water exchange ratio between the lake and the open sea is about 0.1–0.2.

(5) After construction of the new water channel, scallop's larvae have been increasing in lake Saroma. On the other hand, scallop's larvae disperse to a greater exlent by the increased ratio of sea water exchange. Consequently, when larval period is prolonged, scallop's larvae fouling may decrease.

水工研報告 6
1985 pp. 17～26

2，3 の海産魚の走流性状に関する基礎的考察

安永　義暢*・日向野純也*

目　　次

1. 緒　　言……17
2. 実験諸元……17
2.1 実験材料……17
2.2 測定装置……17
2.3 測定項目および測定方法……18
3. 結　　果……18
3.1 走流性の解析……18
3.2 耐流性の解析……18
3.3 流動時の対物行動……19
4. 考　　察……20
5. 結　　言……22
付図……24
Summary……26

1. 緒　　言

我国における魚類の走流行動の研究はニシマスをはじめとする数種の魚類を対象として進められてきたが，全般的に海産魚に関する知見は乏しい。海域下にあっても海潮流をはじめとする種々の流動条件に影響を受ける点から，海産魚の走流行動を把握することは魚道の形成機構，魚礁の設置技術の改善を図る上で重要な意義を有すると考えられる。

筆者は前報[1]においてマダイ幼魚の走流行動について基礎的知見を明らかにしたが，今回，マダイを含む3種の海産魚成魚を対象として同様の研究を行い，魚種間の性状の異同について検討を加えた。

なお，本報では走流行動を流れに反応して上流部に頭部を向け定位する行動として論を進めた。

2. 実験諸元

2.1 実験材料

沿岸性の代表的魚類で魚礁性魚類にあたるマダイ，イシダイ，マアジの3魚種をとりあげた。体長は表1に示すとおり3魚種とも10～20 cm，平均15 cm前後で，主として定置網で漁獲された天然魚である。

2.2 測定装置

走流行動の測定には図1に示す大型の環流水槽を用いた。水槽観測部は6 m×1 m×0.6m，水深0.8mで，前後部に目合い数mmのステンレス製整流網を備える。流速の設定は直径10mmのプロペラ式流速計を用いて観測部水路流軸（図1，P点）にて行い，流速の変更は可変速モーターに連動する遠隔回転計目盛を基準として行った。

表 1　実験材料のサイズ

	Madai	Maaji	Ishidai
BL（cm）	14.9—19.2	14.7—16.8	13.6—18.3
$\overline{BL}$（cm）	17.1	15.7	16.0

行動はテレビカメラを通じて自動録画し，終了後にビデオテープにより解析した。なお，実験魚の撮影サイズを大きくするためズームカメラ2台をイフェクターによって連結し，予めモニターで観測部前半部，後半部を上下2段に合成する方法を用いた。また，タイムジェネレ

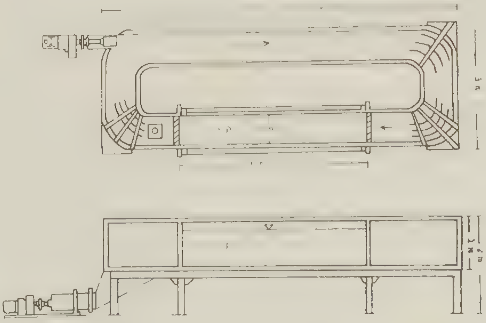


図 1　実験用環流水槽
上図：平面，下図：側面

---

* 水産土木工学部

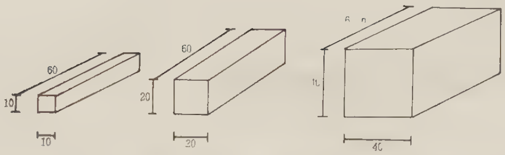


図 2　対物行動実験模型

ーターにより，測定時間を1秒間隔で行動記録画像に合成録画した。

解析にあたっては観測面に設定した20cm×20cmの区画線を基準として実験魚の位置を経時的に追跡し，記録紙上にプロットする方法を用いた。

なお，実験時の水温は10～15°C，塩分32‰で，照度は昼色光ランプにより，散光板を通じて水面上で1,500 lux 前後に調整した。測定時間は午前9時～午後9時までの12時間内を基準とし，同時間帯以外での測定は避けた。また，測定時間内は無投餌とした。

2.3　測定項目および測定方法

測定項目と測定方法を以下に示す

2.3.1　走流性の解析

各魚種1個体を使用し，60分間の測定時間内における走流行動を調べた。設定流速は0～41.3cm/sec までの4段階とし，各流速下のビデオ記録について10秒間隔で実験魚の頭部の向きを判定し，上流部に向けて定位する場合を正の走流行動としてその頻度を求めた。

2.3.2　耐流性の解析

各魚種5個体を使用し，0～76.8cm/secの設定流速下における遊泳状態と前報[1]に準じて60分間の水槽前半部滞泳頻度を指標とする巡航速度を求めた。滞泳位置の測定間隔は10秒とし，また，各測定回の間に実験魚の遊泳力の回復を図るため60分間の休止時間を設けた。

2.3.3　流動時の対物行動

各魚種1個体を使用し，各設定流速条件下における対物行動を調べた。対物行動測定用の模型は図2に示す断面部10cm×10cm，20cm×20cm，40cm×40cmの3サイズの塩ビ製角柱で，同模型を順次観測部底面中央に設置した。

対物行動の判定にあたっては，10秒間隔で60分間の区画別滞泳頻度 f_i を求め，図3に示す区画別接近度指数 p_i を乗じた $\sum f_ip_i$ を接近行動量として算出した。ただし，接近行動指数 $A\cdot I$ はブランク実験に相当する模型非設置時の区画別滞泳頻度 f'_i より算出した $\sum f'_ip_i$ との比 $A\cdot I=\sum f_ip_i/\sum f'_ip_i$ として求め，$A\cdot I>1.0$ の場合を接近行動と評価した。

また，実験魚の流速の選択性を検討するため各設定流速下における模型非設置時および20cm×20cm角柱模型設置時の区画別流速分布を測定した。測定にあたっては設定流速測定時と同じく直径10mmのプロペラ式流速計を用い，各区画の流速を区画中心部における1分間の平均流速で表わした。

3.　結　果

3.1　走流性の解析

表2に示すとおり，非流動下では各魚種とも水槽内を任意の方向に移動するため流向設定方向に対しほぼ半々の割合で体向を変化させ，頻度(%)はマダイで55.8%，マアジで51.4%，イシダイで66.4%となった。

流動条件下では各魚種とも上流に頭部を向けてに明確に反応し，マダイでは13.8～41.3cm/secに至るまで100%の走流行動が示された。マアジは，13.8～25.7cm/secでは100%であったが41.3cm/secでは99.4%となり，0.6%の頻度で背流性が示された。イシダイは前2魚種と比較してやや値が低く，13.8cm/secから41.3cm/secに至る間98.9%から95.8%へと漸減した。

3.2　耐流性の解析

付図1～3に設定流速0～41.3cm/secまでの各魚種の

Division Index

4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	14	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15 ■	■ 15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	1				5					10					15	16				20					25					30

図 3　区画別の接近度指数。黒色部は模型，下端の1～30，左端の1～4の数値は区画の x，y 方向への序列を示す

表 2　走流行動の頻度（%）

V（cm/sec） Species	0	13.8	25.7	41.3
Madai	55.8	100	100	100
Maaji	51.4	100	100	99.4
Ishidai	66.4	98.9	97.5	95.8

表 3　接近行動指数 A・I

V（cm/sec）	Madai	Maaji	Ishidai
0	1.19	1.24	2.02
13.8	1.17	1.78	7.97
25.7	1.42	3.70	2.06
41.3	1.04	0.97	1.38

水槽内分布状態を示す。マダイは0cm/secから41.3cm/secに至るまで底層部を中心に移動し，流速の増加とともに上流部で定位する傾向が明確になる。この傾向はイシダイについてもほぼ同様であるが，上流部での定位は25.7cm/secでもっとも顕著であった。

前2魚種に比較してマアジの分布はやや様相が異なり0cm/secでは最上層にのみ分布する。13.8cm/secでは上流部では下層，水槽中央部では中層，また，下流部では上層と分布が変化し，各区域を経時的に反復移動する傾向が認められた。25.7cm/sec では前記魚種と同様に上流部下層を中心に分布する。41.3cm/sec ではやはり下層を中心に分布するが，上流から水槽中央部を反復移動する傾向が認められた。

一方，設定流速と水槽前半部滞泳頻度(%)との関係を図4に示す。マダイは流速 13.8cm/sec から急速に増大し，41.3cm/secに至るまで100%であったが，62.3cm/secでは約80%に，さらに 76.8cm/sec では 51.3% まで減少した。イシダイは 25.7cm/sec まではマダイと同様の値を示したが，41.3cm/secでは51.0%，60cm/secでは0%と急速に減少した。マアジは0cm/sec では 40.0%とやや小さいが 13.8cm/sec では64.8%に増加，25.7cm/sec で 100%に達した。しかしながら41.3cm/secでは45.7%，60.0cm/sec では0%とイシダイとほぼ同様の急減傾向を呈した。

巡航速度を，前半部での滞留頻度が減少傾向に移り，50%を切る流速として求めるとマアジでは42.9cm/sec，イシダイでは45.7cm/sec と得られた。また，マダイは設定限界流速の76.8cm/sec に至っても50%以下にならなかったため外挿法により77.6cm/sec を得た。

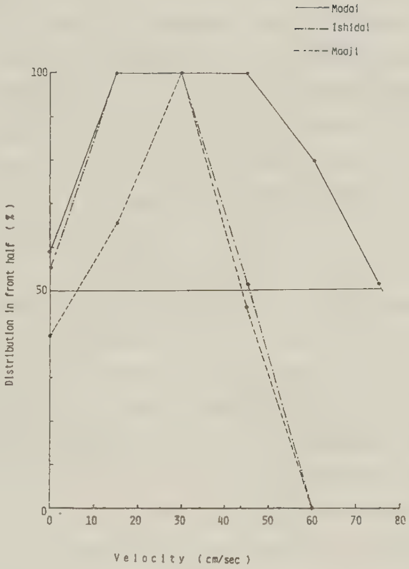


図 4　流速と水路前半部滞泳頻度の関係

3.3　流動条件下の対物行動

付図4～6に 20cm 角柱模型を入れた場合の魚種別，流速別の分布頻度（%）を示す。

マダイ……0cm/sec では分布区画が一定せず，表層，中層にかけて at random な移動傾向が顕著である。13.8cm/sec になると水槽前方部底層に降下し，移動性に乏しくなる。25.7cm/sec では模型前方部底層で前進，後退を繰り返し，41.3cm/sec では模型前方，後方の両底層を往復移動するようになる。

マアジ……0cm/sec ではマダイと同様の分布傾向であるが，やや移動性は乏しく，上層部での遊泳頻度が高い。13.8cm/sec では前方上層を中心に分布するが，25.7cm/sec になると中層から模型前方部上層に分布範囲が拡がる。41.3cm/sec では模型後方部に分布の中心が移り，とくに模型後流域での滞留傾向が生ずるようになる。

イシダイ……流速0cm/sec では底層部の模型前方および後方に分布し，前記種に比較して移動性は乏しい。13.8cm/sec，25.7cm/sec，では模型後方に滞留する傾向が強い。41.3cm/sec では模型直後と水槽後端部とを往復移動するようになる。

以上の結果にもとずいて求められた魚種別，流速別の模型への接近行動指数 *A・I* を表3に示す。マダイは変化が小さく，25.7cm/sec での 1.42を最大とするが，いずれの流速においても *A・I*>1.0 となっている。マアジ

は流速0 cm/sec で1.24となり，マダイよりやや大きい程度であるが，13.8cm/sec では1.78と増加，25.7cm/secでは3.70で最大となった。しかしながら41.3cm/secでは急速に低下し0.97となった。イシダイは0 cm/secですでに他の魚種の2倍近い値を示す。13.8cm/sec では7.97と急増し，最大となったが，41.3cm/sec では2.06，1.38と最大値の¼～⅕に急減した。

4. 考　察

魚類の走流性については代謝生理2) あるいは遊泳機構3) の観点からサケ・マス類を中心に研究されているが，概して，海産魚については報告例に乏しい。しかしながら，沿岸における潮汐流4)，波浪流，沖合における海流5)，吹送流4) は必然的に海産魚の流動環境となり，分布，移動に影響を及ぼしていることが予想される。

走流行動は魚類が流向を感知することによって生ずる反応であり，対象魚類の有する走流性を反映すると考えられる。したがって，表2に示された走流行動の頻度は各魚種の走流性の指標と言えよう。これによれば，3魚種ともに設定した13.8～41.3cm/sec までのいずれの流速条件下においても95～100％となり，走流性は極めて強いと認められる。ただし，3魚種の比較ではイシダイが，95.8～98.9％にとどまっており，相対的に他の2魚種より弱い。

なお，魚類が流向を感知する機構としては側線器官を主体とする系統と視覚にもとずく系統とが考えられている6)。視覚によって流れを感知するためには体位置の移動か，体の移動と異なる速度の物質の移動を視認する必要がある。今回の実験においていずれの系統が主として機能したかは明らかでないが，区画線が体の移動を感知する視覚基準となっていることが推察される。なお，井上ら7) によってイサキ，マルアジで暗視野下での走流行動を認める報告が出されているが，今後視覚を制御した条件下で走流行動を調べ，海産魚の走流性の発現機構を明らかにする必要があろう。

また，著者は前報1) でマダイ幼魚の走流性について検討し，体長の約3倍の流速値に相当する20cm/sec での走流行動の頻度を88.7％と求め，残り12.3％は走流性の断続的欠如による反転行動であることを明らかにした。したがって，成魚についても，より大きい流速下で走流性を調べる必要があるが，体長の約2.5倍に相当する41.3cm/sec においても走流行動の頻度が100％であった点からマダイの場合，幼魚期にくらべ成魚期で走流性が一段と強まる傾向が窺える。

他方，遊泳速度は定義が一定しない点もあり，測定方法も多様であるが，今回採用した測定方法は前報1) マダイ幼魚での巡航速度の測定方法に準ずる。ただし，水路長は前報の小型環流水槽が1.9m であるのに対し約3倍の6mを有し，水路長の供試魚体長に対する倍率は小型環流槽が24～25倍に対し35～40倍と大きく，測定条件は一致しない。しかしながら，今回の測定においても供試魚は0 cm/sec 下で水路前後部間を大きな偏りなく移動しており，前報の測定時の要件，静水時は供試魚の水槽内の行動が前後半部に関して at random であること，は満たされている。

前半部の滞留頻度は図4に示されたごとく各魚種とも一定流速下では静水条件時よりも大きくなっている。この現象は各魚種の走流行動が流向に対して定位する行為のみならず，上流部に移動しようとする溯流行為をも含むことを示唆している。この点は魚礁における魚群の潮

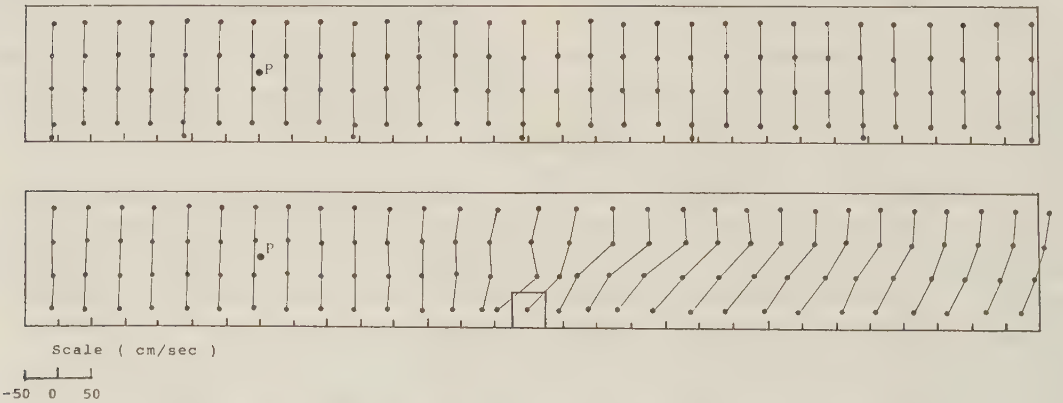


図 5　水路内各区画の流速測定例，上図：模型非設置時，下図：模型設置時
設定流速P点41.3cm/sec，左端が上流側

上定位との関連性で今後の検討に値しよう。

また，魚種間の比較ではマダイの遊泳能力が優れており，巡航速度の体長比は4.5とマアジでの2.7の1.7倍イシダイ2.9の1.6倍の値を有している。他魚種での測定例において巡航速度は体長の2～3倍の値で示されている点からマダイの巡航速度は比較的高い値となる。この点については同魚種の遊泳行動および生理的機構の詳細な検討を通じ裏づける必要があろう。

なお，遊泳行動は水温あるいは塩分によって影響される可能性があり，今後これらの条件を変化させた場合の遊泳速度の変化についても調査が望まれよう。

一方，前後半部の滞留頻度の変化とともに，マアジでは流速の増大にともなって，上層から下層方向への遊泳層の変化が生じている。図5上図に例示するように，整流効果によって上，下層間の流速の差は極めて小さい。したがって，流速の選択による行動ではなくマアジ自体が流速の増加に対し能動的に下層に向かう性状を有するためか，同魚種の型態あるいは遊泳行動の特性から他動的に潜航を余儀なくされるためのいずれかが考えられよう。この点についてはさらに深い水槽での実験，あるいは生態的知見との照合により明らかにされよう。

次に，海産魚の対物行動は魚礁への蝟集行動との関連性を目的とし，おもに走触刺激の観点から研究が進められてきた。このために，礁性魚類に属する定座性，穴居性の強い魚種以外の魚種では対物行動が明らかとなっていない。しかしながら，ブリ，アジ類その他の接触行動に乏しい魚種についても魚礁での蝟集を認める報告[8]があり，今後これら沖合性の浮魚類を対象とする魚礁設置に向け，単に走触性のみにとどまらぬ多様な観点での対物行動の機構解明が求められよう。

今回の実験はこれらの観点に立った上で従来の静水条件下の対物行動実験を発展させ，物体と流水との両条件の組み合わせ下で行なった。したがって，実験魚の行動自体は多分に複雑さを呈しているが，付図1～3の模型非設置時の行動をブランク実験とみなし，付図4～6の対物行動実験を比較することである程度明らかにすることが可能である。

まず，マダイの場合，模型非設置時の静水条件下では下層を中心に水路内を往復するのに対し，模型設置時では接近行動には乏しいながら模型を中心に上中層を往復する行動様式に変化している。前報[1]マダイ幼魚に関しても模型を設置した場合において非設置時のランダムな遊泳が模型を中心とする円孤状の往復遊泳に変化することが明らかにされている。今回，成魚に認められた移動様式の変化もこれと同様で，非設置時は水路内の視覚刺激が均質的であるが，模型設置時は模型が特異的な視覚刺激となっていることを反映していると考えられる。他方，流動条件下，模型設置時においては設置域を中心として分布する傾向が強まり，条件次第で模型への接近行動をとることが明らかにされた。

マアジはブランク時と模型設置時の差がさらに顕著である。まず，静水条件下では非設置時の上層に限定された分布が中層まで拡大され，みかけ上模型への接近傾向が生じている。次いで流動条件下13.8cm/sec，25.7cm/secではブランク時に見られた下層への移動が模型設置時に認められず前方上，中層での分布となっている。

この相違が生ずる理由としては模型の設置によって底層部の流速の変化，あるいは視覚刺激にもとずく行動上の変化が考えられるが仔細な点についてはさらに検討を必要とする。また，41.3cm/secでは模型後方部での分布頻度が増加しているが，同区域は模型の存在によって縮流あるいは乱流状態となっており，これらの水理的変化との関連性が推察されよう。

イシダイは前記2種と違って明らかに模型への接近性が強く，静水条件下では前後方両域，流動条件下では後方域に蝟集している。ただし，流速が増大すると模型からやや遠ざかる傾向が認められることから流動状態では模型後方の渦流域を選択するものの，流速が増大し，乱れ度が大きくなると定位が困難となるために後退し，再度模型に接近する行動を繰り返すと考えられる。

なお，表3の接近行動指数のうち，マダイの25.7cm/secにおける最大値1.42は模型前方での分布頻度の高さ，イシダイの13.8cm/secにおける最大値7.97は模型後方部での分布頻度の高さを反映している点で両魚種に関しては対物行動の定量方法として一定の妥当性を有すると評価される。しかしながら，マアジにおいては流速41.3cm/secにおいて模型周辺部での分布頻度が高いにも関わらず接近行動指数は1.0以下となり，他の2魚種にくらべ模型への接近度が低下するという結果となっている。付図5のごとく非設置時は水路中央部前後の中・底層を中心に分布し，模型を設置する区画に接近する様相を呈している。これに対し，模型設置時は模型よりやや離れた水路中央部上・中層での分布頻度が高い。したがって，$\Sigma f_i' p_i = 3,561$，$\Sigma f_i p_i = 3,471$で，模型非設置時＞模型設置時，となっており，今後模型の設置位置を変化させることにより再検討を要する。

以上の諸点から模型設置時の水路内の分布様式は魚種，流速によって異なることが明らかにされたが，模型の設置による環境条件の相違点としては前述視覚上の行動基準点の付加と周辺部での流況変化が挙げられる。

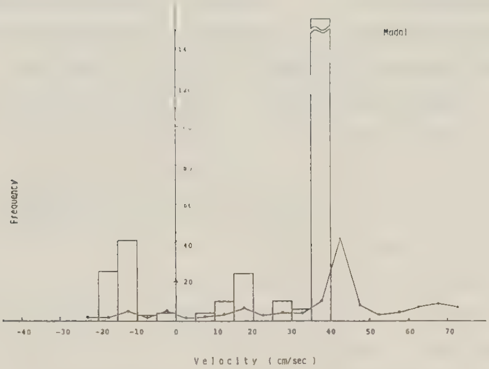


図 6　模型設置時の流速分布頻度（折れ線グラフ）とマダイの滞泳頻度（棒グラフ）の関係

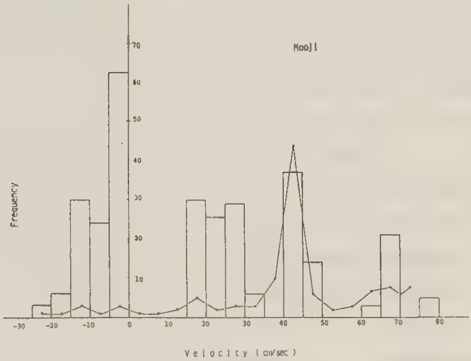


図 7　模型設置時の流速分布頻度（折れ線グラフ）とマアジの滞泳頻度（棒グラフ）の関係

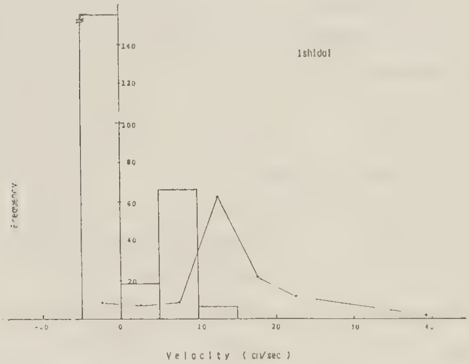


図 8　模型設置時の流速分布頻度（折れ線グラフ）とイシダイの滞泳頻度（棒グラフ）の関係

図6～8には折線で20cm 角柱模型設置時の各区画の流速を5 cm/sec 間隔の頻度グラフで示す。また，棒グラフで各流速を呈す区画における実験魚の滞泳頻度を測定回数を指標として表わす。設定流速は構造物近辺での遊泳が認められたマダイ，マアジでは41.3cm/sec，イシダイでは13.8cm/secとした。いずれの場合も設定流速を中心とする流速レンジがモードとなり，模型後方中・下層の緩流，反流域，模型後方上層での縮流効果による急流域がその左右に表わされている。

これに対し，実験魚の流速別滞泳頻度は魚種によって異なり，マダイでは35～40cm/sec，15～20cm/sec，－10～－15cm/sec にモードが見られるが，このうちの35～40cm/sec がぬきん出て大きい。したがって，本魚種は設定流速よりやや小さい，体長の 2～2.5倍程度の値の流速を選択する傾向を有することが認められよう。

マアジは設定流速およびこれより大きい急流域での滞留も認められるが，最大値を示すモードは0～－5 cm/sec にある。本魚種が急流域で遊泳する行動性を有しながらも断続的に緩流域，反流域に滞留する傾向の強いことを認め得よう。

イシダイは緩流域，反流域での滞留が顕著であり，とくに後者での滞留頻度の高いこと明らかである。この点は本魚種が付図6に示されているように静水条件下では模型の前後部に分布するが，流動条件下の13.8cm/secでは模型後方に偏っている点と符合する。

5. 結　　言

流動環境に対する海産魚類の反応，行動に関する基本的検討を行った。今回対象とした3魚種以外の魚類についても当然同様の研究が必要ではあるが，魚礁性魚類に該当する3魚種の走流行動，巡航速度，対物行動等に関して一定の共通性，相違性を明らかにすることができた。明らかにされた性状は3魚種の海域下における移動および滞留の様式をある程度反映しているとともに，一方では本研究を通じて得られた行動学的知見から説明可能な3魚種の生態も存在することが推察される。

今後は各種海産魚の分布，移動と海潮流の関係，あるいは流動条件下における魚礁への蝟集生態等に関する知見を集積，整理するとともに，その因果関係の解明にあたって行動生理学的手法の導入を順次図っていくことが必要と考えられる。

本論を終えるにあたり，御校閲戴いた菅原水産土木工学部長，御講評戴いた中村企画連絡室長に深謝の意を表します。また，本研究は沿整直轄研究「物理化学環境と魚類の行動の関係に関する研究」の一部であることを付記し，予算面で御尽力下さった関係者各位に御礼申しあげる次第です。

参考文献

1) 安永義暢：小型環流水槽によるマダイ幼魚の走流行動の観察，水工研報告　No. 5，1～23，1984

2) J.R. BRETT：The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. Fisheries Res. Bd. of Canada. 21(4)，1183～1226，1964

3) 平石智徳・山本勝太郎・利本勝沼・佐藤　修：流れに定位しているニジマスの遊泳形状について，日水誌　50(6)，937～942，1984

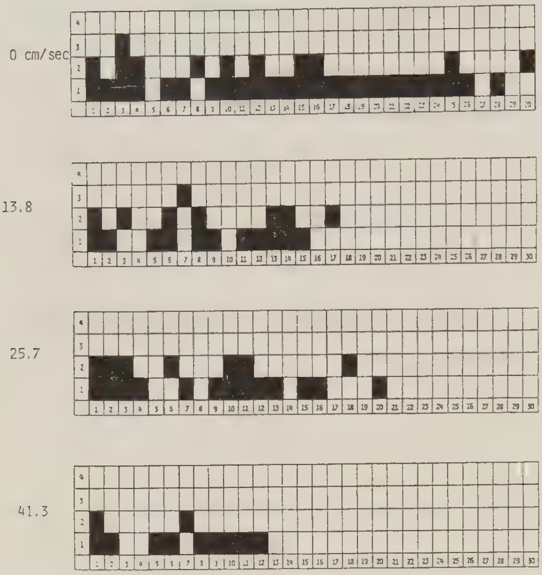
4) 武内智行・乃万俊文：久慈沖（茨城県）底層流速調査（第1報），水工研技報　No. 4，11～44，1983

5) 上北征男・中村　充・秀島好昭：海底礁による地形性湧昇流に関する研究，水工研報告　No. 5，33～66，1984

6) 井上　実：魚の行動と漁法，恒星社厚生閣，15～29，1979

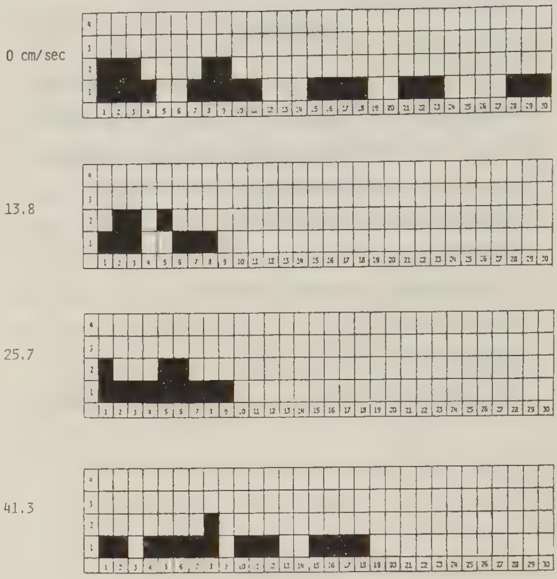
7) 井上　実・有元貴文・任　為公：海産魚類の明・暗環境における向流行動，日水誌，50(1)，63～69，1984

8) 水産庁：昭和54年度人工礁漁場造成事業調査報告抄録集，1983



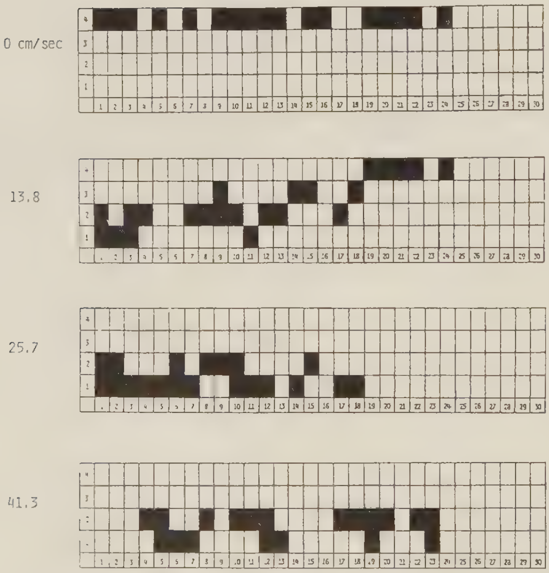
Madai

付図 1　マダイの水路内分布．各図左端が上流側，以下各付図とも同様



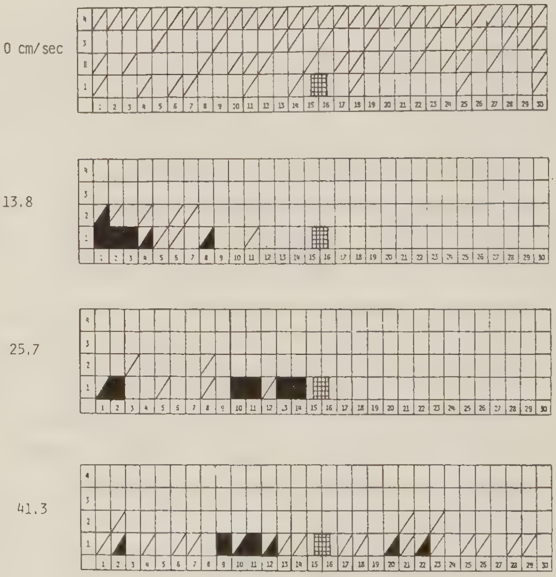
Ishidai

付図 3　イシダイの水路内分布



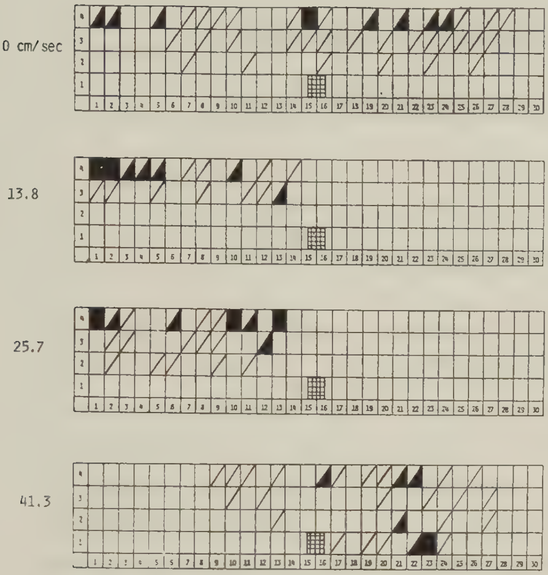
Maaji

付図 2　マアジの水路内分布



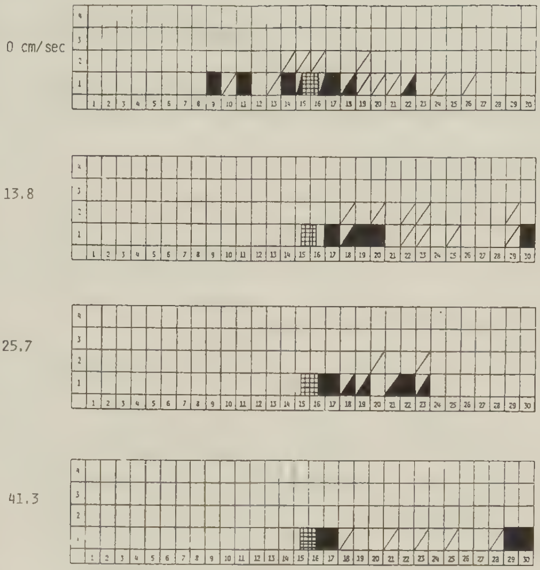
Madai

付図 4　模型（格子枠）設置時のマダイの水路内分布。四角$\geqq 2\alpha$，$2\alpha >$三角$\geqq \alpha$，$\alpha >$斜線$\geqq 0$，ただし，$\alpha =$等分布平均値0.84%



Maaji

付図 5　模型（格子枠）設置時のマアジの水路内分布，図中模様の説明は付図4に同じ



Isidai

付図 6　模型（格子枠）設置時のイシダイの水路内分布，図中模様の説明は付図4に同じ

A Consideration about Rheotaxitic Behaviour of A Few Species of Marine Fish

By

Yoshinobu YASUNAGA and Junya HIGANO

Summary

There have been few research on rheotaxis of marine fish as the influence of current on the behaviour of them seems to be negligible in the ocean. The fact that distribution of marine fish around the reef has a relation with ocean current as tidal current has been found in the recent research. There still remain many problems unsolved about the relation between gathering behaviour of fish an the variation of current around the reef. In view of the above rheotaxitic behaviour in current were researched through ethological method with a circulation tank.

Materials were three species of marine fish, red sea bream, *Pagrus major*, parrot fish *Oplegnathus fasciatus* and horse mackerel *Trachurus japonicus*. The behaviour of the materials in the tank was recorded with television set and analyzed with video recorder. The intensity of rheotaxitic behaviour did not vary with species so much, though red sea bream was stronger than the other two species in the respect of counter action to current.

The cruising speed of red sea bream, 77.6 cm/sec was the biggest among three species and equivalent to 4.5 times the body length. That of parrot fish was 45.7 cm/sec equivalent to 2.9 times the body length and that of horse mackerel was 42.9 cm/sec 2.7 times.

The character of gathering behaviour forwards the model set on the bottom of the channel was the most remarkable in parrot fish both in current condition and no-current condition. Red sea bream approached seemingly the model in case that the current velocity was 25.7 cm/sec.

When the variation of current velocity was caused by the setting of the model, red sea bream swam selectively in the front part of the channel where the current velocity was equivalent to about 2.5 times the body length, parrot fish swam behind the model where water moved in opposit direction and horse mackerel swam above the model where the vortex was caused and water moved slowly.

水工研報告　6
1985　pp. 27～87

底層密度流先端部の水理特性に関する研究[**]

武内　智行[*]

A Study on the Hydraulic Characteristics of the Head of Bottom-Layer Density Currents

By Tomoyuki TAKEUCHI

目　次

1.　序　論……28
1.1　研究の背景と目的……28
1.2　研究の対象……28
1.3　研究の方法……30
1.4　記述の順序……30
2.　従来の研究および本研究の目標……31
2.1　形状特性……31
2.2　移動特性……31
2.3　流況特性……32
2.4　本研究の目標……33
3.　数値解析手法……33
3.1　MAC 法の概要……34
3.2　本手法の特色……34
3.3　基礎方程式……35
3.3.1　速度場・圧力場……35
3.3.2　密度場……35
3.3.3　水位変化……35
3.4　境界条件……36
3.4.1　壁面における境界条件……36
3.4.2　自由表面における境界条件……36
3.5　計算手順……37
3.5.1　初期セット……37
3.5.2　密　度……37
3.5.3　流体領域識別……37
3.5.4　仮圧力・表面圧力……38
3.5.5　表面セル圧力補間……39
3.5.6　出力処理……39
3.5.7　時間処理……39
3.5.8　新流速・新圧力……39
3.5.9　マーカー粒子移動・水位変化……40
3.5.10　自由表面・固定壁面での流速処理……41
3.5.11　渦動粘性係数モデル……42
3.6　計算安定条件……43
4.　水理実験方法……43
4.1　実験方法……43
4.2　実験装置……43
4.3　実験条件……44
4.4　データ解析方法……44
5.　結果とその考察……44
5.1　流れの概略……44
5.2　主な記号と無次元化……45
5.3　形状特性……45
5.3.1　水理実験結果……45
5.3.2　数値解析結果……46
5.3.3　考　察……46
5.4　移動特性……47
5.4.1　水理実験結果・数値解析結果……47
5.4.2　考　察……49
5.5　流況特性……52
5.5.1　数値解析結果……52
5.5.2　考　察……54
5.6　水位変化……56
5.6.1　数値解析結果……56
5.6.2　考　察……56
5.7　その他の結果と考察……57
5.7.1　ゲート位置でのフルード数……57

---

[*] 水産土木工学部

[**] 本論文は著者の学位論文（東京大学審査農学博士，昭和59年6月25日付）の全部である。ただし，本報への掲載に際し，執筆規程上の修正ならびに若干の改筆を行った。

5.7.2　準定常部における内部界面マサツ抵抗係数……57
5.8　数値解析手法の検証……59
5.9　計算所要時間……59
6.　結　論……59
あとがき……60
記号表……60
参考文献……62
資　料……64
Summary……85

1.　序　論

1.1　研究の背景と目的

近年，沿岸海域開発，水域の環境保全，水資源開発などの問題が複雑化し，それらの問題を解決するためには，水域における流動環境の詳細な把握が従来以上に必要となってきている。中でも，沿岸海域，河口域，ダム湖などの流動環境は水温分布，塩分分布，濁度分布等の非一様性により，密度流の影響を受けることが多いため，密度流現象に関する水理特性の定量的把握が重要視されるに至っている。そのため，密度差に起因する水理現象・沿岸海洋現象の定量的解明は今日の水理学・海洋学における先端的課題の一つとなっている。

このことは，水産の分野においても例外ではない。水産の分野においては，二百海里時代を迎え，沿岸漁業資源のより一層の増殖・保護・育成を行うため，資源管理培養型漁業への転換がはかられている。その一つとして，獲る漁業から作る漁業への展開がはかられている。そのための重要施策の一つとして沿岸漁場整備開発事業（通称，沿整事業）が鋭意推進されている。この事業は，いわゆる水産土木的手法をもとに，第一には，沿岸海域における流れを利用または制御し，卵稚仔や浮遊幼生を好適環境に輸送・集積・着底させて初期減耗を防ぐとともに，幼稚仔の保護・育成の場をも造成して沿岸漁業資源の再生産性を高めようとするものである。なお，卵稚仔や浮遊幼生には遊泳能力はほとんどないので，それらの輸送・拡散・集積は海水の流動特性からほぼ把握できると考えられる。第二には，仔魚や成魚に対して，密度の異なる水塊は行動の制約因子となるから，水塊の運動を予察して，これを利用あるいは制御して漁業生産場の造成を行うものである。

このようなことから，水産土木研究において，「生物幼生と流動環境に関する研究」，「密度の異なる水塊の運動と魚の行動に関する研究」などが重要課題となっている[1]。いずれの課題も流動環境についての微細かつ定量的な把握が基礎として不可欠であり，中でも先端部をもつ密度流現象が最近特に注目されている。これは，水塊としての海水流動が浮遊生物などの拡散・集積や魚の移動経路などと深く関連し，漁業資源の再生産助長にきわめて重要と考えられるからである。

たとえば，河口域における塩水楔の非定常的挙動は，汽水域を形成するとともに，栄養塩や底質の分布を変化させ，それが餌料生物の分布にも変化を与える。また，塩水楔の界面付近には浮遊幼生が集積しやすいと考えられるようになってきている。このような機構は，河口域のもつ重要な特性の一つと考えられる。この特性により，河口域は魚類の育成場（ナーサリー）を形成し，さらには天然の漁業資源の再生産場となっている。

また，沿岸海域における内部波の大陸棚への打上げは浅海域への栄養塩の供給源として重要と考えられてきており，さらには，内部波先端部の移動と魚類の移動経路との関連についての報告例[2]などもある。これらの現象は，漁業資源の再生産のみならず，人工魚礁の配置計画を定めるためにも重要である。

ところが，以上のような現象は定性的に予測されているものがほとんどであって，定量的に予測するためには，これらに関わる密度流現象そのものの定量的把握に待つところが極めて大きい。

したがって，先端部をもつ密度流現象，とりわけ底層密度流先端部の水理特性の定量的解明は，沿岸海域や河口域における漁業資源の再生産や魚類の移動経路との関連においてきわめて意義深く，水産土木研究上最も重要な課題の一つといえよう。

本研究は，これらの密度流現象の定量的解明を行って，沿岸海域における有用水産生物種の増養殖に役立てようとするものである。

1.2　研究の対象

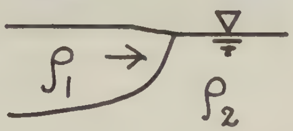
密度流先端部は一般に表1のように分類されよう。すなわち，上層流（表層流）先端部，中層流先端部，下層流（底層流）先端部の3つに大別される。下層流先端部については，底面勾配によりさらに，遡上流先端部，水平流先端部，流下流先端部に分類される。なお，若干の具体例を図1に示す。図中，カギ括弧内の番号は表1の分類番号に対応している。

さて，水産土木の分野で現在最も注目されているのは，前述のことから，下層流先端部のうち遡上流先端部

表1　密度流先端部の分類

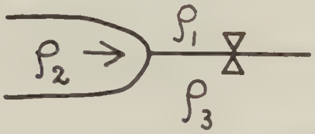
A classification of density fronts

（1）上層流先端部　**軽い流体が重い流体の上に拡がって行く場合**
（表層流）



例・水面への油流出
・温排水放流
・海洋表層フロント

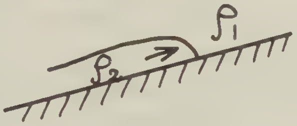
（2）中層流先端部　**成層流体の内部界面へ中間密度の流体が貫入していく場合**



例・成層した貯水池への濁水流入
・成層した内湾への外海水の流入

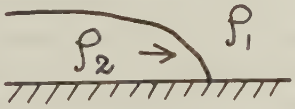
（3）下層流先端部　**重い流体が軽い流体の下にもぐり込んでいく場合**
（底層流）

（i）遡上流先端部



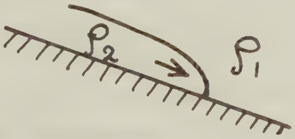
例・内部波の大陸棚斜面および大陸棚への遡上

（ii）水平流先端部



例・砂嵐（寒冷前線）
・水門からの塩水侵入
・塩水くさび

（iii）流下流先端部

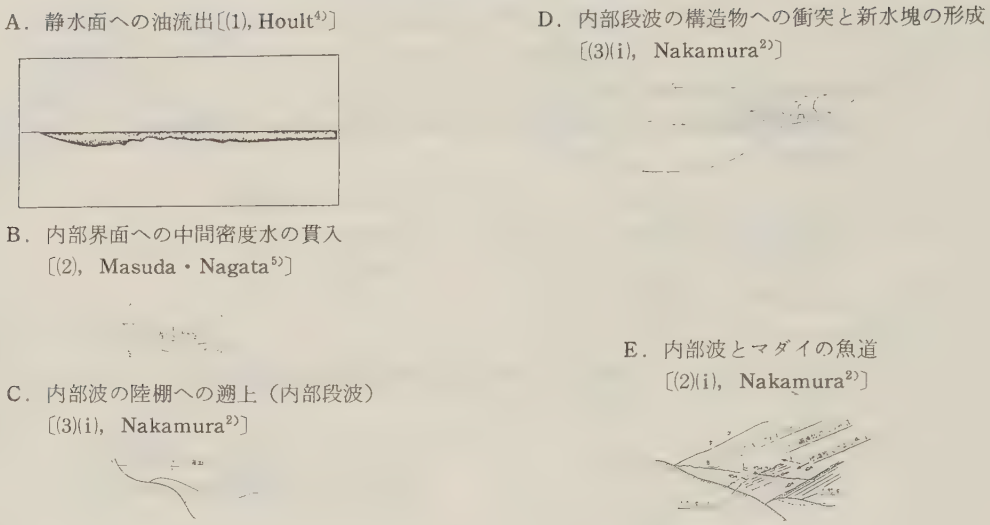


例・貯水池への濁水流入
・海底の泥水密度流

と水平流先端部である。この先端部の流動に関する諸特性，すなわち，内部流況特性，移動特性，形状特性等の定量的把握が必要なのである。移動特性や形状特性のみでは水産土木上不十分であり，内部流況特性の把握が不可欠である。このことは，浮遊幼生などの輸送・集積・着底や底質の巻き上げなどを予察する上で，鉛直断面内での速度分布状態を無視し得ないと考えられることからも明らかであろう。

ところで，密度流研究において，定常的ないしは準定常的な現象，一次元的把握が可能な現象などについては，従来から数多くの研究がなされ，それなりに貴重な成果があげられてきている。しかし，非定常的な現象，二次元的あるいは三次元的把握を必要とする現象になると，その定性的研究は古くにさかのぼるものもあるが，定量的研究の歴史は浅く，必ずしも十分な成果は得られていない，密度流先端部に関する研究は後者の代表例であろう。

たとえば，下層流先端部に関する研究は Schmidt[3] に



A．静水面への油流出〔(1), Hoult$^{4)}$〕

B．内部界面への中間密度水の貫入〔(2), Masuda・Nagata$^{5)}$〕

C．内部波の陸棚への遡上（内部段波）〔(3)(i), Nakamura$^{2)}$〕

D．内部段波の構造物への衝突と新水塊の形成〔(3)(i), Nakamura$^{2)}$〕

E．内部波とマダイの魚道〔(2)(i), Nakamura$^{2)}$〕

図1 先端部をもつ密度流の例

Examples of density currents

はじまるが，従来の研究において水平流先端部の場合についてすら，その移動特性，形状特性は実験者によって結果に相違があり，その原因は究明されていない。また，内部流況特性に関しては定性的把握にとどまっており，定量的把握例はほとんど無いといってよい状況にある。

このようなことから，本研究においては，まず下層流先端部のうち水平流先端部に焦点をあててその諸特性の定量的把握を行うことにする。ただし，底面勾配が緩やかな場合の特性は，水平流でもってある程度の近似が可能と考えられるので，それほど一般性は失われないであろう。

なお，下層水平流先端部の形成は開放交換流れ（Densimetric Exchange Flow）の方法によるものとする。すなわち，水路の両端を隔板で仕切り，その途中にゲートをおく。ゲートの両側に密度の異なる流体（たとえば，淡水と塩水）をそれぞれ貯留し，十分静止させたのちゲートを瞬開して流れを生じさせる。

また，強混合型密度流を対象とすることは，現段階ではいたずらに議論を混乱させるおそれがあるので，弱混合型または緩混合型と見なせる範囲を扱うことにする。内部界面における混合過程をも含めた研究は，それだけで一つの重要な課題となっており，本研究の成果を一つの基礎として将来展開したいと考える。

1.3 研究の方法

さて，下層水平流先端部の移動特性，形状特性に関しては，従来の実験値がいくつかあるが，実験者による相違が大きい。したがって，実験条件の違いや実験中の時間変動を十分考慮した水理実験を行ってそれらを再吟味せねばならない。

一方，水理実験による内部流況の把握は従来にも試みがあるが，現在の実験技術ではその定量的把握は困難である。そこで，本研究においては数値解析手法を用いることとし，水塊としての流動把握が可能な MAC 法（Marker and Cell method）を本目的のために改良，拡張する。

ところで，近年の数値解析技術の発展とコンピュータの高速化・大容量化により，複雑な流れを数値的にシミュレートすることが容易になりつつあるが，数値解析手法を非定常密度流現象に応用した例はきわめて少なく，必ずしも十分な検証は行われていない。したがって，本研究においては数値解析手法そのものの検証も課題である。これに関しては，水理実験結果と数値解析結果との相互比較によって行うことにする。

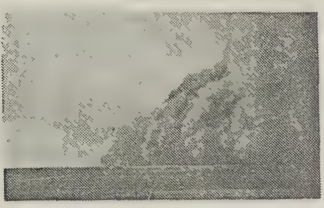
このように，本研究では，水理実験と数値解析の両手法を用いて，下層流先端部の水理特性を Densimetric Exchange Flow を一例として定量的に考察する。また数値解析手法の開発と検証を合わせて行う。

1.4 記述の順序

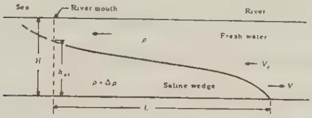
本章以後，次の順序で論述を進める。

最初に，従来の研究成果を概括し，本研究における目標を明確化する（第2章）。次に，本研究にて改良・拡

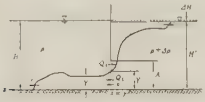
F．大気中の砂嵐〔(3)(ii)，Turner[6]〕



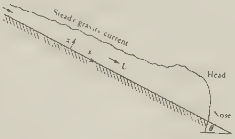
G．塩水くさび〔(3)(ii)，Keulegan[7]〕


Sea
River mouth
River
Fresh water
ρ
H
h_{oi}
V_i
$\rho+\Delta\rho$
Saline wedge
V
L

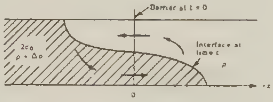
H．ゲートから侵入する密度フロント
〔(3)(ii)，Tamai[8]〕


ΔH
ρ
$\rho+\Delta\rho$
H'

I．斜面を流下する密度フロント
〔(3)(iii)，Turner[5]〕


Steady gravity current
z
x
t
Head
Nose
θ

J．Densimetric Exchange Flow
〔(3)(ii)+(1)，Keulegan[7]〕


Barrier at $t=0$
$\rho+\Delta\rho$
Interface at time t
ρ
0
x

K．成層化した貯水池での密度流
〔(3)(iii)+(2)，Fukuoka et al[9]〕

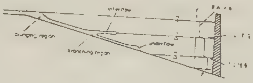

interflow
plunging region
underflow

図1
(continued)

張した数値解析手法，ならびに水理実験方法を述べる（第3章，第4章）。その上で，水理実験と数値解析の二つの結果を示し，それらを合わせて考察を行うとともに，数値解析手法の検証をも行う（第5章）。最後に，本研究の主要成果をまとめるとともに，今後に残された課題等を記して結論とする（第6章）。

なお，資料編には，本研究の基礎資料として重要と考えられるデータの一覧表，ならびに本研究にて開発した数値解析手法のプログラムソースリストなどをまとめた。

2.　従来の研究および本研究の目標

本章では，下層水平流先端部に関する従来の研究を，形状特性，移動特性，流況特性の三つの面から概括する。その上で，本研究における目標を明らかにする。

2.1　形状特性

Ippen・Harleman[10] は緩勾配の流下流先端部の二次元的形状は，先端部の最大厚さで無次元化すると相似形となることを示した。その後，Middleton[11] は緩勾配流下流および水平流先端部について同様の結果を得た。Keulegan[12][13]も同様の結果を得ていることを Middleton[11] は引用している。しかし，相似形状そのものは実験者により若干の相違がある。その原因の一つとしてレイノルズ数の影響が考えられている[11]が，詳細な検討は未だなされていない。

また，三次元的形状に関しては Simpson[14][15] などの研究がある。若干の定量化を試みているものの定性的把握にとどまっている。

なお，Kármán[16] は非粘性無限水深下では，先端部と底面とのなす角が $\pi/3$ となることを理論的に示している。

2.2　移動特性

先端部の無次元平均移動速度$\bar{K}$は，一次元非粘性理論によれば0.5の一定値をとる[16][17][18]。一方，今までの主要な実験結果[11]~[13],[17]~[23]をまとめると表2のようになる。$\bar{K}=0.31\sim0.59$までの範囲にわたっているが，その平均は0.45程度である。すなわち，理論値は実験値より一割方大きい。このことは，一次元理論解析において先端部でのエネルギー損失を無視していることに起因すると考えられる。武内[24]は，先端部における抵抗を考慮して，先端部の移動に関する一次元非定常支配方程式系を導いた。しかし，その方程式系を用いた解析によると，先端部と底面とのなす角が徐々に減少する結果となってしまう[25]。実験においてもその傾向はあるが，きわめてわずかである。これは，先端部での鉛直速度成分を考慮していないことに原因があると考えられ，一次元的解析

には限界がある。

なお，表2の中で，Keulegan（1958）[13]の値は引用者により異なっている。原文が未公開のため入手できていないので断言はできないが，0.57という値はKeulegan自身 Yih の0.45を引用している[26]ことからみて，特殊な場合の値と考えられる。

ところで，既存の実験値のバラツキは本質的なものなのであろうか。同一実験内においても移動速度は時間変動を示すことが知られている（Barr[27]，武内[24]）が，従来この点には十分考慮が払われていなかったものと思われる。このことによるバラツキがかなり大きいと考えられる。また，従来の実験的研究において，実験条件の違いが必ずしも十分には考慮されていないように思われる。

図2はこれらの一例として，Middleton[11]，室田・神田[19]の実験結果を再整理したものである。彼らは，同一実験内における移動速度の時間変化を十分考慮せずに平均移動速度を算出している。また，実験条件がいずれもレイノルズ数の狭い範囲にとどまっている。そのため，平均移動速度$\bar{K}$が内部レイノルズ数 Re によって若干変化することが示唆されつつも，その確認はなされていない。

したがって，今後は，実験条件の違いや実験中の移動速度の時間変化特性を十分考慮して詳細な検討を行う必要がある。そのことによって，従来の実験値を再吟味せねばならないであろう。

2.3　流況特性

先端部周辺の流況について，Schmidt[3]，Middleton[11]は流跡線を可視化して示した。

一方，先端内部の流況について，Middleton[11]はトレーサー粒子を用いて実験的解明を試みたが，精度が悪く定性的把握にとどまっている。Daly・Pracht[28]はMAC法による数値解析によって内部流況を示した。しかし，彼らの計算は相対密度差εの大きい領域（$\varepsilon=0.05$～2.0）を対象としており，相対密度差の小さい場合には，彼らの方法は表面付近での数値的発散を伴うため安定した計算が不可能である。図3はDaly・Pracht とほぼ同

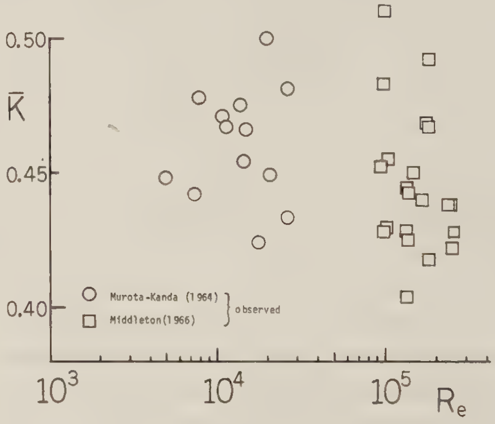


図2　先端部の平均移動速度〔従来の実験値の例〕

Average velocity of front（$\bar{K}$）against the Reynolds number（Re）〔Murota・Kanda（1964），Middleton（1966）〕

表2　Kの主な実験値一覧

Experimental values of average velocity of front（K）

Table 2　Experimental values of average velocity of front ($\bar{K}$)

Name	$\bar{K}=\bar{u}_f/\sqrt{\varepsilon g H_0}$	References
O'Brien-Cherno(1932)	0.46-0.59	(Table1)
Keulegan(1957)	0.462	[Barr(1967)]
Keulegan(1958)	0.57	[Harleman(1961),Barr(1963),Murota-Kanda(1964),JSCE(1975)]
	0.46	[Middleton(1966)]
	0.462	[Barr(1967)]
Harleman(1961)	0.45	
Murota-Kanda(1964)	0.31-0.50	
Yih(1965)	0.47	(Fig.39)
	0.45	[Keulegan(1950),JSCE(1975)]
Middleton(1966)	0.44(0.40-0.51)	
Barr(1967)	0.465	
Takeuchi(1979-1981)	0.45(0.38-0.52)	

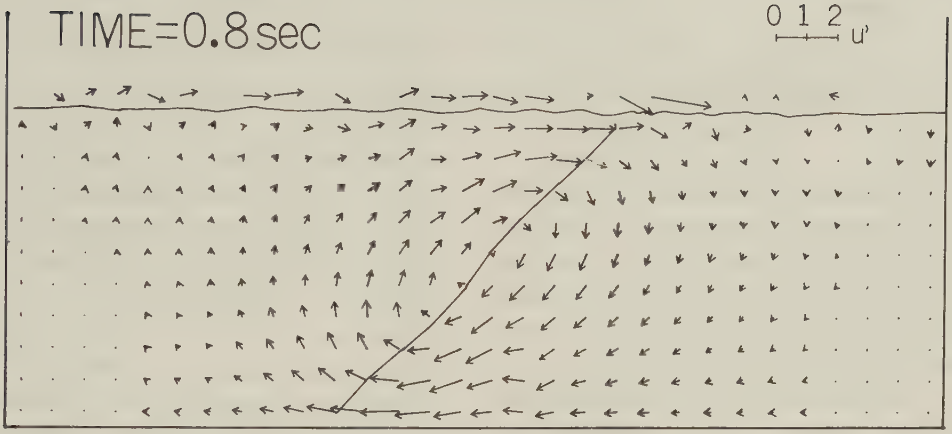


図3　従来の MAC 法による計算例

A sample calculation of Densimetric Exchange Flow with Daly・Pracht's MAC method（$H_0=10$cm, $L_1=L_2=15$cm, $\varepsilon=0.03$, $\mu=1.0$g/cm/sec）

じ方法で計算した一例である（$\varepsilon=0.03$）[29]。表面付近の流速に異常が見られ，この直後表面付近で数値的発散が生じて計算は続行不可能となった。

武内[30][31]は，MAC 法をさらに改良・拡張し，相対密度差の小さい場合にも極めて安定な計算を可能とした。

以上のように，水理実験による内部流況の把握は，従来にも試みがあるが，現在の実験技術ではきわめて困難であるため，その定量的把握は進んでいない*。一方，数値解析手法を用いて内部流況を定量的に知ることが可能になりつつある。したがって，水理実験による定量的把握に努めることはもちろん重要であるが，当面は数値解析手法によってそれを補う必要があろう。

2.4　本研究の目標

以上のように，先端部の形状特性や移動特性については，若干定量的な研究がなされてきているものの，実験者によって結果に相違がある。特に移動特性に関しては実験者による結果の相違がきわめて大きい。その重要な原因として，実験条件の差や実験中の時間変動に対する考慮が不十分であることが考えられる。

また，流況特性については，先端部周辺の流況は実験的把握がある程度可能であるが，先端内部の流況に関しては，従来の実験手法による定量的把握はきわめて困難である。このようなことから，先端部の諸特性は経験的な関係式に頼らざるを得ない現状にある（福岡ら[32]），といわれているが，それすらも確立していないと言ってよいであろう。

他方，近年の数値解析技術の発展とコンピュータの高速化・大容量化により，このような密度流現象を数値的にシュミレートすることが容易になりつつある。しかし，非定常密度流現象に数値解析手法を応用した例は未だ数少なく，必ずしも十分な検証は行われていない。したがって，数値解析手法そのものの検証も行う必要がある。

以上をふまえ，本研究では以下の3項目を主要目標として研究を進めることにする。

① 先端部の形状特性・移動特性について，実験条件の違いや実験中の時間変動をも十分考慮した詳細な検討を行うとともに，従来の実験値の相違の原因を究明すること。

② 先端部の流況特性について，MAC 法を改良・拡張した二次元数値解析手法を開発し，それを用いて定量的に明らかにすること。

③ なお，形状特性・移動特性等については水理実験と数値解析との両面から比較考察し，数値解析手法の検証を行うこと。

3.　数値解析手法

本章では，本研究にて開発した数値解析手法（MAC 法を自由表面をもつ二流体非定常密度流用に改良・拡張したもの）について述べる。

---

* 最近，福岡ら[32]は貯水池への濁水流入問題を念頭において，流下流先端部に関する精力的な研究を開始した。しかし，鉛直速度成分をも含めた流況の定量的把握には至っていない。

3.1　MAC 法の概要

最初の MAC 法（Marker-and-Cell method）は粘性をもつ二次元非圧縮性非定常自由表面流の数値解析法として発表された[33)34)]。その概念は次のようなものであった：

変幻自在な自由表面の位置を常にとらえておくためには，流体中に標識としてのマーカー粒子（marker particle）を配置し，流体部分とそうでない部分とを常に判別し得るようにすればよい。すなわち，計算開始時 $T=t_0$ に流体部分の各セル（MAC 法では一つ一つの計算格子をセルという）にマーカー粒子を配置しておき，以後速度場にのせてマーカー粒子を刻々と移動させながら，各時間ステップごとに流体部分とそうでない部分（マーカー粒子を含むセルと含まないセル）との判別を行う。通常，二次元非圧縮性流の計算では従属変数として流速成分 u，v と圧力 p の代りに流れ関数 Ψ と渦度 ω を用い，変数の数を一つ減らす。しかし，MAC 法ではマーカー粒子を移動させるのにその位置での流速を知る必要があり，かつ自由表面での応力条件を満足させる必要上，流体運動の基礎方程式(Navier-Stokes の運動方程式と連続の式)をそのままの形で用いる。流速・圧力などの変数値は流体部分の各セルについて求めればよい。なお，マーカー粒子は速度場・圧力場などの計算には直接関与しないが，計算結果の視覚化，いうなれば流れの可視化に重要な役割をもつ。

さらに，この考え方は内部境界面をもつ密度流にも応用できる。たとえば二流体の場合には2種類のマーカー粒子を用いて内部境界面を表わすことができる。この場合，種類の異なるマーカー粒子にそれぞれ異なった密度を仮想することによって各セルの密度計算に用いることもできる。

ところで，開発された当初の MAC 法には次のような欠点があった[34)35)]。

① 計算の基礎となる差分式の安定性不足。
② 計算セルの標識づけの種類が多くかつアルゴリズムも複雑。
③ 自由表面での境界条件の取扱いの粗雑さ。
④ 流体部分の全領域に均一にマーカー粒子を配置しているための計算不経済性（自由表面部分のみ識別できればよい）。
⑤ 外部境界は長方形セルでつくることのできる形状に限定されている。

これらの欠点に対する反省から MAC 法の展開改良がなされている[31)34)36)]。たとえば次のような手法がある。

SUMMAC 法[37)]は特に水面位置を精確にとらえるための高次近似を取入れた手法で，孤立波の伝播に関する問題に適用された。

NUMAC 法[38)]は成層した貯水池への濁水流入問題等に応用するために開発されたが，密度差の大きい領域を対象としている。（計算例は相対密度差が 0.2 である。）

SMAC 法[39)]は最初の MAC 法の境界条件の繁雑さを緩和（特に圧力に関する収束計算の部分を改良）し演算所要時間が著しく改善された手法である。SMAC 法は MAC 法のその後の発展に大きな影響を与えた。武内はこの手法の基本アルゴリズムを応用し，表面条件等の取扱いに改良を加えた上で自由表面をもつ急変不定流解析に適用して良好な結果を得ている[40)]。

ABMAC 法[41)]は自由表面の取扱い方を固定壁面まで拡張して任意の外部形状をもつ流れへの適用を可能とした手法である。また，圧力を求める収束計算の過程に圧力・流速同時緩和法が導入された。なお，この手法は移動壁面も扱えるように改良された[42)]。

SOLA 法[43)]は ABMAC 法の特徴を有しながらも，比較的安定した自由水面をもつ流れに対象を限定して計算の簡易化をはかっている。

このように，改良された手法がいくつか挙げられるが，密度流を対象としたものは極めて少ない。しかも，密度流を対象とするもののほとんどは密度差の大きい領域を扱っている。

3.2　本手法の特色

前節でも述べたが，MAC 法を密度流に応用した例は少ない。しかも，従来の計算は密度差の大きい領域（相対密度差が最も小さい場合で，0.05，通常 0.2 程度）を対象としており沿岸海洋域（相対密度差0.03以下）へは適用できない。その最も重要な原因は，自由表面における安定性不足であろう。従来の手法を密度差の小さい領域に適用すると自由表面において数値的発散が生じ，安定な計算ができないのである。図3はその一例で，自由表面付近で数値的発散が生じかかっており，計算の続行は不可能である（実際，この直後に発散している）。

したがって，自由表面における数値的安定性を高めることが必要である。これは，表面条件のより厳密な適用によって可能と考えられ，本手法ではそれを行った。その他にもいくつかの改良・拡張を行ったが，本研究にて開発した手法の主な特色は次の3つにまとめられよう。

① 自由表面変化の扱いに水位を変数として導入すると

同時に，表面条件のより厳密な適用を行った。その結果，相対密度差の小さい場合についても安定な計算が可能となった。

② 圧力を求める収束計算の部分に圧力・流速同時緩和法を用い，演算の簡素化をはかった。

③ 従来は粘性係数を一定として計算されていたが，格子網スケール渦動粘性係数モデルを導入し，乱流を加味した計算を可能にした。なお，乱流粘性モデルの導入は，計算安定条件をより容易に満足させるためにも有効である。

3.3 基礎方程式

温度変化，表面張力などの効果は無視し，流れは二次元非圧縮性とする。また，拡散はここでは考えない。

3.3.1 速度場・圧力場

速度場，圧力場を求めるための基礎方程式として(1)〜(3)式を用いる。

$$D=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}=\rho g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma'_{yx}}{\partial y} \qquad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y}=\rho g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \sigma'_{xy}}{\partial x} \qquad (3)$$

ここに，ρ：密度，p：圧力，μ：粘性係数，g_x, g_y：x，y 方向外力成分，u，v：x，y 方向流速成分である。また σ' は粘性ストレステンソルの成分であり，ニュートン流体では，

$$\sigma'_{xx}=2\mu\frac{\partial u}{\partial x},\quad \sigma'_{yy}=2\mu\frac{\partial v}{\partial y},$$

$$\sigma'_{xy}=\sigma'_{yx}=\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

で表わされる。

なお，(1)式は質量保存の式（連続の式）を非圧縮性の条件を用いて簡単化したものである。すなわち，一般に質量保存の式*は，

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho \boldsymbol{V})=0$$

であるが（$\boldsymbol{V}$：流速ベクトル），物質微分 $\frac{D}{Dt}$ を用いて次のようにも表わされる。

$$\frac{D\rho}{Dt}+\rho\,\mathrm{div}\,\boldsymbol{V}=0 \qquad (5)$$

ところで，非圧縮性流体では，運動中個々の流体素片の密度は一定に保たれるから

$$\frac{D\rho}{Dt}=0 \qquad (6)$$

が成立する。したがって，(5)，(6)式より(4)式は簡単化されて

$$\mathrm{div}\,\boldsymbol{V}=0 \qquad (7)$$

となる[44]。これを成分で示したのが(1)式である。

(2)，(3)式は二次元非圧縮性流体の運動方程式をそれぞれ x，y 方向に展開した式である。

3.3.2 密度場

(1)〜(3)式より速度場・圧力場を求めることができるが，密度場は次式によらねばならない。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}=0 \qquad (8)$$

しかし，ここでは拡散を考慮しない二流体非定常密度流を対象としているので，二種のマーカー粒子を用い，密度は各セル中の二種のマーカー粒子の個数の重み付き平均値として算出することができる。すなわち，あるセルに仮想密度 ρ_1，ρ_2 の流体マーカー粒子がそれぞれ n_1，n_2 個含まれているとき，そのセルの密度 ρ は

$$\rho=\frac{\rho_1 n_1+\rho_2 n_2}{n_1+n_2} \qquad (9)$$

で与えられる（図4）。なお，この場合初期状態にてマーカー粒子は均一に配置されていなければならない。また，マーカー粒子は速度場にのって移動するから，(9)式は(8)式の差分近似式に相当する式と考えられる。

3.3.3 水位変化

水位 h を変数として導入し，水位変化は自由表面における運動学的境界条件から求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+u\frac{\partial h}{\partial x}=v \qquad (10)$$

ここで，h は x 座標に対して一価でなければならない。したがって，本式の導入により自由表面の変動に対する適用範囲がその条件の成立範囲内に限定されていることに注意されたい。ただし，自由表面の変動が比較的少ない場合には，本式の導入はきわめて有効であることが，本研究で明らかとなった。

なお，任意の自由表面形状変化を扱いたい場合は従来通りマーカー粒子を用いて自由表面を識別すればよい。

(10)式は次のように誘導される[45]。一般に変形境界面の形が $F(x,\ y;\ t)=0$ で与えられるとき，その境界面における運動学的条件は $DF/Dt=0$ である。水表面は，

---

* ここでは，温度・密度の拡散を無視している。それを考慮しても結論(7)式は成立する。

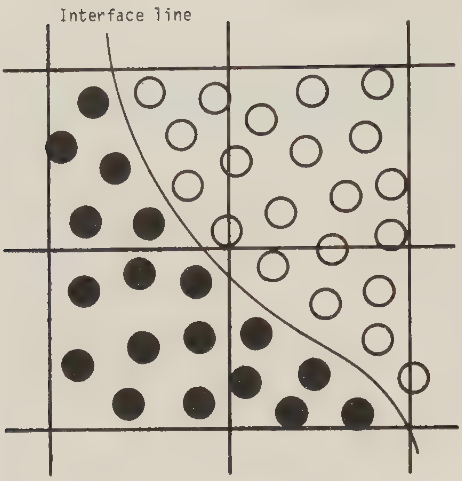


図4　二種のマーカー粒子と内部境界面
Two kinds of marker particles and the interface line

$$y=h(x\,;\,t) \tag{11}$$

で与えられるから，上式を陰関数表示して，

$$F(x,y\,;\,t)=h(x\,;\,t)-y=0 \tag{12}$$

となる。これを $DF/Dt=0$ に代入して(10)式を得る。

3.4　境界条件*

3.4.1　壁面における境界条件（図５）

(1)　Freeslip 条件：壁面が非粘着性あるいは滑面の場合に用いる。法線方向の流速は壁面にて０，接線方向の流速は壁面にてコウ配をもたない。

$$v_{i,\,j-\frac{1}{2}}=0\,;\ u_{i+\frac{1}{2},\,j-1}=u_{i+\frac{1}{2},\,j} \tag{13}$$

(2)　Noslip 条件：壁面が粘着性あるいは粗面の場合に用いる。法線方向，接線方向の流速とも壁面にて０。

$$v_{i,\,j-\frac{1}{2}}=0\,;\ u_{i+\frac{1}{2},\,j-1}=-u_{i+\frac{1}{2},\,j} \tag{14}$$

なお，本論文中の計算には Freeslip 条件を用いている。

(1) Free-slip condition

$V_{i,j-\frac{1}{2}} = 0\ ;\ U_{i+\frac{1}{2},j-1} = U_{i+\frac{1}{2},j}$

(2) No-slip condition

$V_{i,j-\frac{1}{2}} = 0\ ;\ U_{i+\frac{1}{2},j-1} = -U_{i+\frac{1}{2},j}$

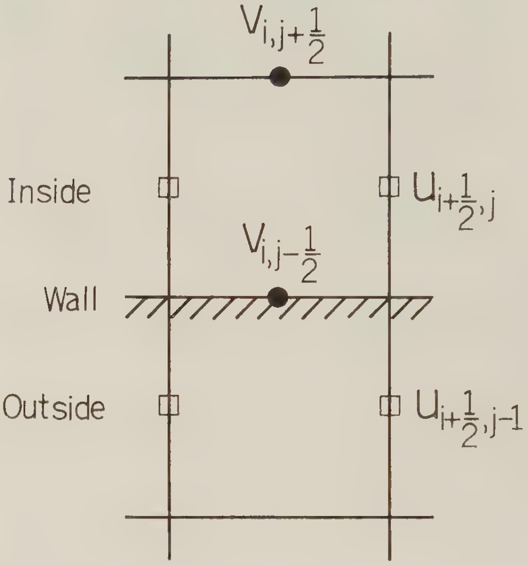


図５　壁面境界条件
Position of variables at a bottom wall

3.4.2　自由表面における境界条件

非圧縮性粘性流体の自由表面において，ストレステンソル $\boldsymbol{\sigma}_{ik}$

$$\boldsymbol{\sigma}_{ik}=-p\delta_{ik}+\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k}+\frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right)=-p\delta_{ik}+\boldsymbol{\sigma}'_{ik}$$

（ここに，p：圧力，δ_{ik}：クロネッカーのデルタ，μ：粘性係数である。）は次の条件式を満足する[46]。

$$\boldsymbol{\sigma}_{ik}\boldsymbol{n}_{k}=\boldsymbol{\sigma}'_{ik}\boldsymbol{n}_{k}-p_{ni}=0 \tag{15}$$

ここに，$\boldsymbol{\sigma}'_{ik}$：粘性ストレステンソル，$\boldsymbol{n}_k$：$x_k$ 方向単位ベクトル，p_{ni}：x_i 方向法線圧力である。この式を $x-y$ 座標系にて法線方向成分と接線方向成分とに分けるとそれぞれ(16)，(17)式になる。

$$p-2\mu\Bigg(n_xn_x\frac{\partial u}{\partial x}+n_xn_y\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)+n_yn_y\frac{\partial v}{\partial y}\Bigg\}=0 \tag{16}$$

$$\mu\Bigg\{2n_xm_x\frac{\partial u}{\partial x}+(n_xm_y+n_ym_x)\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)+2n_ym_y\frac{\partial v}{\partial y}\Bigg\}=0 \tag{17}$$

ここに，n_x，n_y：法線方向単位ベクトルの x，y 方向成分，m_x，m_y：接線方向単位ベクトルの x，y 方向成分，μ：粘性係数。

水面コウ配 θ がわかれば n_x，n_y が容易に定まり，(18)式を用いて自由表面における圧力 p_s を求めることができる。

---

* 流入境界，流出境界，コーナーセル等の境界条件については，本論文中の計算には用いていないので説明を省略する。ソースリストには組込んである。

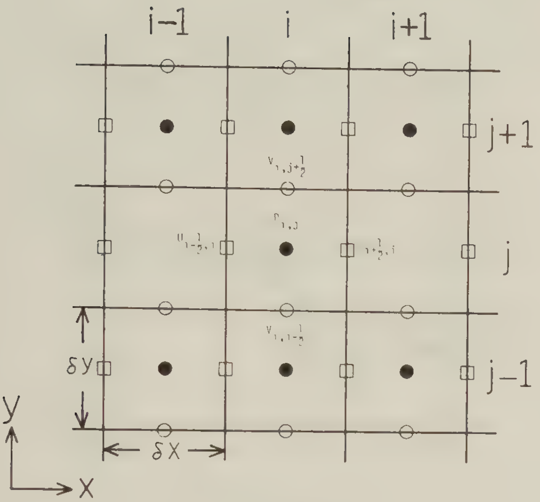

i−1
i
i+1
j+1
j
j−1
$v_{i,j+\frac{1}{2}}$
$p_{i,j}$
$u_{i-\frac{1}{2},j}$
$u_{i+\frac{1}{2},j}$
$v_{i,j-\frac{1}{2}}$
δy
δx
y
x

図6　変数配置

The location of cell variables

自由表面における流速は連続の式から求める。この場合，流速については計算の都合上 θ は45°刻み*で近似せざるを得ない。

なお，SUR セルが隣合せに並んだ場合，すぐ外側の EMP セルでの流速値（u または v）が計算上必要となる。その値は(17)式を用いて求められる。

3.5　計算手順

基礎方程式および境界条件式等を差分近似して解く。その際，$\delta x\times\delta y$ の大きさの長方形セルの格子網を考え，変数配置は図6のようにする（流速以外の変数はセル中央に配置する）。

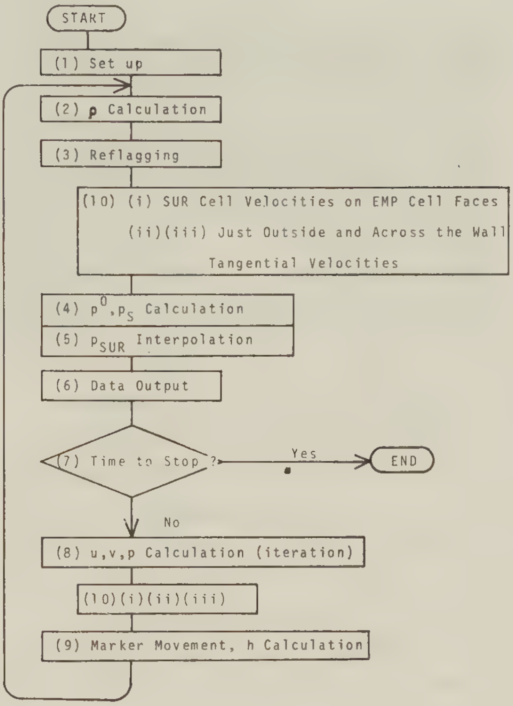
計算の概略の流れを図7に示す。以下，図の流れに従って計算手順の概略を説明する。以下，各項目の最下位の番号は図中の括弧内の番号に対応する。

3.5.1　初期セット

初期条件（初期流体領域，初期流速，マーカー粒子初期位置等）の設定，境界条件等に関するパラメータ値の入力をする。

3.5.2　密　度

各セルに含まれている2種のマーカー粒子の個数をカウントし，(9)式に従って各セルの密度を算出する。


START
(1) Set up
(2) p Calculation
(3) Reflagging
(10) (i) SUR Cell Velocities on EMP Cell Faces
(ii)(iii) Just Outside and Across the Wall
Tangential Velocities
(4) p^0, p_S Calculation
(5) p_{SUR} Interpolation
(6) Data Output
(7) Time to Stop ?
Yes
END
No
(8) u,v,p Calculation (iteration)
(10)(i)(ii)(iii)
(9) Marker Movement, h Calculation

The Calculational cycle

図7　計算手順

The calculational cycle

3.5.3　流体領域識別

各時間ステップにおいて計算の対象となるのは流体を含むセルである。流体を含むセルとそうでないセルとの判別を行う際，各セルに標識（MAC 法ではフラッグという）を付けておくと計算上の取扱いが容易となる。

各セルは基本的に次の5通りに分類される（図8）。

OB : Obstacle Cell（障害物セル）
EMP : Empty Cell（空のセル）
SUR : Surface Cell（自由表面セル）
FUL : Full Cell（流体で満たされたセル）
BND : Boundary Cell（境界セル）

流体で満たされた FUL セル，流体を含みかつ一つ以上の EMP セルと接している SUR セル，および流体を含まない EMP セルの3種のセルは自由表面の変化に応じてフラッグの変化する可能性をもつ。すなわち，EMP セルが SUR セルになったり，SUR セルが FUL セルになったり，あるいはそれらの逆の変化があり得る。これらに対し，OB セルと BND セルは通常固定されており，変化しない。

---

* これは $\delta x=\delta y$ の正方形セルの場合である。一般の長方形セルの場合は $\pm\alpha=\tan^{-1}(\delta y/\delta x)$ を用いてこの角度を表現すべきである。ここでは表現上の簡便さから便宜上45°と表現しているにすぎないことに注意。

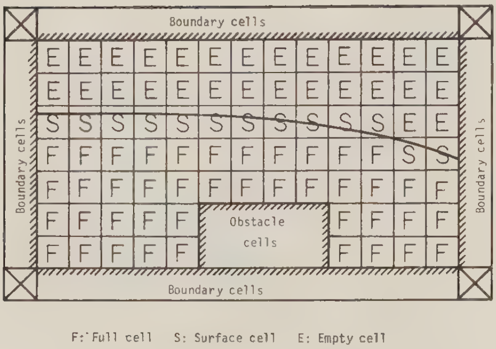

Boundary cells
E E E E E E E E E E E E E
E E E E E E E E E E E E E
S S S S S S S S S S S E E
F F F F F F F F F F F S S
F F F F F F F F F F F F F
F F F F F Obstacle cells F F F F
F F F F F F F F F
Boundary cells
Boundary cells
Boundary cells
F: Full cell　S: Surface cell　E: Empty cell

図8　計算メッシュとセルフラッグ

A computing mesh and cell flags

ここでの仕事は，セルフラッグの変化を判定し，次の時間ステップにおける計算対象領域を確定することである。速度場・圧力場等の計算対象領域となるのは流体を含むセル，すなわちFULセルとSURセルである。なお，本論文では水位を変数として導入しているので，SURセルの識別はマーカー粒子にはよらずセルの中心線（y軸方向）と水面との交わる点が存在するセルをSURセルとした。

3.5.4　仮圧力・表面圧力

ここでいう仮圧力とは，新圧力（次の時間ステップでの圧力）を求める際の第0次近似値である。仮圧力にはこの時間ステップでの圧力値を用いればよい。ただし，最初の時間ステップではあらかじめ与えねばならない。ある基準高さ y_0 をとり，そこを基準として水深方向に静水圧的分布を与えることにする。

$$p^0=\rho g(y-y_0) \tag{18}$$

なお，仮圧力には任意の値を用いてよいが，3.5.8における反復計算の収束性に影響する。

自由表面における圧力は(16)式から求められる。水面コウ配 θ は水位変数を用いて容易に算出される（図9）。SMAC法などでは水面コウ配を45°* 刻みで近似していたが，本手法では±45°以内*の任意の傾きを扱っている。

SURセルとEMPセルとの位置関係としては，一般的に図10に示す15通りが考えられる。その各々の場合について，(16)式より表面圧力 p_s を求める差分近似式は次のようになる。（ここで，$\sin\theta=-n_x$，$\cos\theta=n_y$）。

(1)　水位変数 h を使用するときは，2，3，6，7の4通りのみ考慮すればよい。

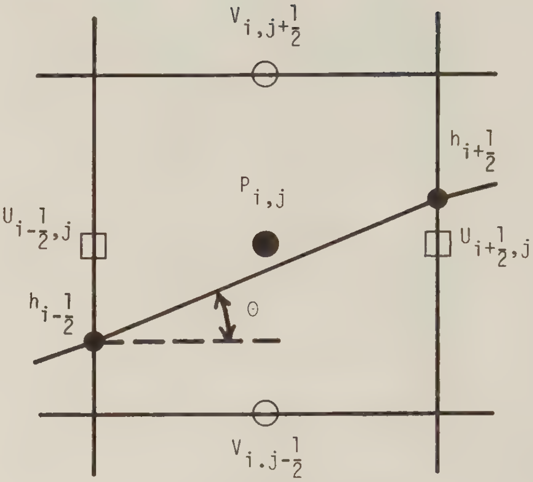

$V_{i,j+\frac{1}{2}}$
$h_{i+\frac{1}{2}}$
$P_{i,j}$
$U_{i-\frac{1}{2},j}$
$U_{i+\frac{1}{2},j}$
$h_{i-\frac{1}{2}}$
Θ
$V_{i.j-\frac{1}{2}}$

図9　水面勾配

Position of variables at a free surface

①　2の場合

$$p_s=2\mu\left\{\sin^2\theta\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x}+\cos^2\theta\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta y}\right.$$
$$-\sin\theta\cdot\cos\theta\cdot\left(\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i-1,j+\frac{1}{2}}}{2\delta x}\right.$$
$$\left.\left.+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j-1}+u_{i-\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j-1}}{2\delta y}\right)\right\} \tag{19}$$

②　3の場合

$$p_s=2\mu\left\{\sin^2\theta\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x}+\cos^2\theta\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta y}\right.$$
$$-\sin\theta\cdot\cos\theta\cdot\left(\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i-1,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\right.$$
$$\left.\left.+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j-1}}{\delta y}\right)\right\} \tag{20}$$

③　6の場合

$$p_s=2\mu\left\{\sin^2\theta\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x}+\cos^2\theta\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta y}\right.$$
$$-\sin\theta\cdot\cos\theta\cdot\left(\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\right.$$
$$\left.\left.+\frac{u_{i-\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j-1}}{\delta y}\right)\right\} \tag{21}$$

④　7の場合

$$p_s=0.0 \tag{22}$$

(2)　水位変数 h を用いないときは全ての場合についての考慮が必要である。なお，このとき，水面コウ配は45°*刻みで近似せざるを得ない。

①　1，4の場合

---

* これは便宜上の表現であって，厳密にはセルのアスペクト比をとる。

* 前脚注参照

$$p_s=2\mu\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x} \qquad (23)$$

② 2，8の場合

$$p_s=2\mu\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta y} \qquad (24)$$

③ 3の場合

$$p_s=\mu\left(\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i-1,j+\frac{1}{2}}+v_{i,j-\frac{1}{2}}-v_{i-1,j-\frac{1}{2}}}{2\delta x}\right.$$
$$\left.+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j-1}+u_{i-\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j-1}}{2\delta y}\right) \qquad (25)$$

④ 6の場合

$$p_s=-\mu\left(\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}+v_{i+1,j-\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{2\delta x}\right.$$
$$\left.+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j-1}+u_{i-\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j-1}}{2\delta y}\right) \qquad (26)$$

⑤ 9の場合

$$p_s=-\mu\left(\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i-1,j+\frac{1}{2}}+v_{i,j-\frac{1}{2}}-v_{i-1,j-\frac{1}{2}}}{2\delta x}\right.$$
$$\left.+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}-u_{i+\frac{1}{2},j}+u_{i-\frac{1}{2},j+1}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{2\delta y}\right) \qquad (27)$$

⑥ 12の場合

$$p_s=\mu\left(\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}+v_{i+1,j-\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{2\delta x}\right.$$
$$\left.+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}-u_{i+\frac{1}{2},j}+u_{i-\frac{1}{2},j+1}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{2\delta y}\right) \qquad (28)$$

⑦ 5，7，10，11，13，14，15の場合

$$p_s=0.0 \qquad (29)$$

3.5.5 表面セル圧力補間

圧力は変数としてセル中央に配置されている。したがって，表面セルの圧力 P_{SUR} と前項で求めた自由表面での圧力 p_s とは必ずしも一致しない。計算上必要なのは表面セルでの圧力である。次式の直線補間式によって表面セルでの圧力を求める（図11）。

$$P_{SUR}=\eta p_s+(1-\eta)P_{FUL} \qquad (30)$$

（ただし，$\eta=\delta y/d$）

3.5.6 出力処理

適当な時間ステップ間隔で計算結果（流れの様子）を出力する。

3.5.7 時間処理

計算を終了すべき時間ステップに達していたら計算を終了させる。そうでなければ，時間ステップを1つ進める。

3.5.8 新流速・新圧力

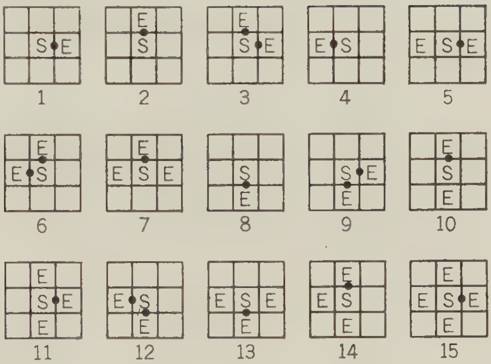


図 10　EMP セルと SUR セルとの可能な配置

The 15 possible arrangements of EMP cell(s) about a SUR cell

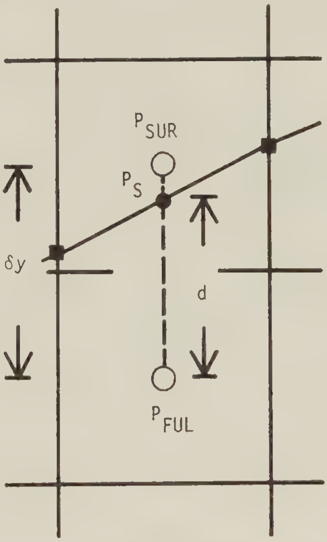


図 11　表面セル圧力補間

Surface cell pressure interpolation

運動方程式(2)，(3)式の差分近似式として本手法では(31)〜(34)式を用いる。(31)，(32)，(34)式は Welch ら33)，(33)式は Young ら47)によるものである。なお，右辺において時間ステップの添字 n を省略している。

$$(\rho u)^{n+1}_{i+\frac{1}{2},j}=(\rho u)_{i+\frac{1}{2},j}+\delta t\left[\frac{(\rho u^2)_{i,j}-(\rho u^2)_{i+1,j}}{\delta x}\right.$$
$$+\frac{(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}-(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}{\delta y}$$
$$+2\frac{\mu_{i+1,j}(u_{i+\frac{3}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j})-\mu_{i,j}(u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j})}{\delta x^2}$$
$$+\frac{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}{\delta y}\left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}-u_{i+\frac{1}{2},j}}{\delta y}+\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\right)$$

$$-\frac{\mu_{i+\frac{1}{2},\,j-\frac{1}{2}}}{\delta y}\left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},\,j}-u_{i+\frac{1}{2},\,j-1}}{\delta x}+\frac{v_{i+1,\,j-\frac{1}{2}}-v_{i,\,j-\frac{1}{2}}}{\delta x}\right)$$

$$\left.+\rho_{i+\frac{1}{2},\,j}g_x+\frac{p_{i,\,j}-p_{i+1,\,j}}{\delta x}\right] \tag{31}$$

$$(\rho v)^{n+1}_{i,\,j+\frac{1}{2}}=(\rho v)_{i,\,j+\frac{1}{2}}+\delta t\left[\frac{(\rho uv)_{i-\frac{1}{2},\,j+\frac{1}{2}}-(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},\,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\right.$$

$$+\frac{(\rho v^2)_{i,\,j}-(\rho v^2)_{i,\,j+1}}{\delta y}$$

$$+2\frac{\mu_{i,\,j+1}(v_{i,\,j+\frac{3}{2}}-v_{i,\,j+\frac{1}{2}})-\mu_{i,\,j}(v_{i,\,j+\frac{1}{2}}-v_{i,\,j-\frac{1}{2}})}{\delta y^2}$$

$$+\frac{\mu_{i+\frac{1}{2},\,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},\,j+1}-u_{i+\frac{1}{2},\,j}}{\delta y}+\frac{v_{i+1,\,j+\frac{1}{2}}-v_{i,\,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\right)$$

$$-\frac{\mu_{i-\frac{1}{2},\,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\left(\frac{u_{i-\frac{1}{2},\,j+1}-u_{i-\frac{1}{2},\,j}}{\delta y}+\frac{v_{i,\,j+\frac{1}{2}}-v_{i-1,\,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\right)$$

$$\left.+\rho_{i,\,j+\frac{1}{2}}g_y+\frac{p_{i,\,j}-p_{i,\,j+1}}{\delta y}\right] \tag{32}$$

ただし，

$$\left.\begin{aligned}(\rho u^2)_{i,\,j}&=\rho_{i,\,j}\cdot u_{i+\frac{1}{2},\,j}\cdot u_{i-\frac{1}{2},\,j}\\(\rho v^2)_{i,\,j}&=\rho_{i,\,j}\cdot v_{i,\,j+\frac{1}{2}}\cdot v_{i,\,j-\frac{1}{2}}\end{aligned}\right\} \tag{33}$$

また，移流項には第二次風上差分（いわゆる donor-cell 法）を用い，

$$(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},\,j+\frac{1}{2}}=\frac{\rho_{i,\,j-1}+\rho_{i+1,\,j-1}}{2}\cdot u_{i+\frac{1}{2},\,j-1}\cdot$$

$$\frac{v_{i,\,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,\,j-\frac{1}{2}}}{2}$$

$$if\quad \frac{v_{i,\,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,\,j-\frac{1}{2}}}{2}\geqq 0$$

$$(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},\,j+\frac{1}{2}}=\frac{\rho_{i,\,j}+\rho_{i+1,\,j}}{2}\cdot u_{i+\frac{1}{2},\,j}\cdot\frac{v_{i,\,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,\,j-\frac{1}{2}}}{2}$$

$$if\quad \frac{v_{i,\,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,\,j-\frac{1}{2}}}{2}<0 \tag{34}$$

などとする。

ところで，(31)，(32)式から求められる新流速 u^{n+1}，v^{n+1} は一般に連続の式を満たしていない。なぜなら，たとえば右辺における圧力 p が仮圧力であるからである。したがって，連続の式を満たすように何らかの補正をしつつ，新流速・新圧力を求めねばならない。ここでは，Viecelli が導いた圧力・流速同時緩和法[42)48)]を用いることにする。すなわち，以下のようにして新流速・新圧力を求める。

連続の式を満たさないことに対する補正として，圧力の第 l 回反復値を次式で求める。

$$p^{l}_{i,\,j}=p^{l-1}_{i,\,j}+\delta p_{i,\,j} \tag{35}$$

ここに，$\delta p_{i,\,j}$ は本来0となるべき連続の式の未満足分 $D_{i,\,j}$ に比例するようにとる。

$$\delta p_{i,\,j}=\beta D_{i,\,j}$$

$$=-\beta\left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},\,j}-u_{i-\frac{1}{2},\,j}}{\delta x}+\frac{v_{i,\,j+\frac{1}{2}}-v_{i,\,j-\frac{1}{2}}}{\delta y}\right)$$

$$\beta=\frac{\beta_0}{2\delta t}\bigg/\left(\frac{1}{\delta x^2}+\frac{1}{\delta y^2}\right) \tag{36}$$

ここに，β_0 は緩和係数（relaxation parameter）で1.7～1.9程度が最適とされている。

さて，(31)，(32)の式中，時間ステップ n において既知の項をまとめて ξ と ζ とで表現すれば，

$$(\rho u)^{n+1}_{i+\frac{1}{2},\,j}=\xi_{i+\frac{1}{2},\,j}+\frac{\delta t}{\delta x}(p_{i,\,j}-p_{i+1,\,j}) \tag{37}$$

$$(\rho v)^{n+1}_{i,\,j+\frac{1}{2}}=\zeta_{i,\,j+\frac{1}{2}}+\frac{\delta t}{\delta y}(p_{i,\,j}-p_{i,\,j+1}) \tag{38}$$

を得る。右辺の圧力 p の第0次近似値として前述の仮圧力値 p^0（**3.5.4** 参照）を用いれば，これより新流速 u^{n+1}，v^{n+1} の第1近似値が求められる。この u^{n+1}，v^{n+1} を(36)式に代入すると(35)式から p の第1近似値が求められる。この p を再び(37)，(38)に代入して，u^{n+1}，v^{n+1} の第2近似値が求められる。以下同様にして p，u^{n+1}，v^{n+1} を同時に収束させていく方法が Viecelli の提案した同時緩和法である。

この方法の中で，p を(37)，(38)式に代入して，u^{n+1}，v^{n+1} の次の近似値を得る手順は，(36)式で求められる δp を用いて，u^{n+1}，v^{n+1} を次のように修正することと同じである。（複号同順，右上肩の添字はここでは反復回数を示す。）

$$\left.\begin{aligned}u^{l+1}_{i\pm\frac{1}{2},\,j}&=u^{l}_{i\pm\frac{1}{2},\,j}\pm\frac{\delta t}{\delta x}\delta p_{i,\,j}\\v^{l+1}_{i,\,j\pm\frac{1}{2}}&=v^{l}_{i,\,j\pm\frac{1}{2}}\pm\frac{\delta t}{\delta y}\delta p_{i,\,j}\end{aligned}\right\} \tag{39}$$

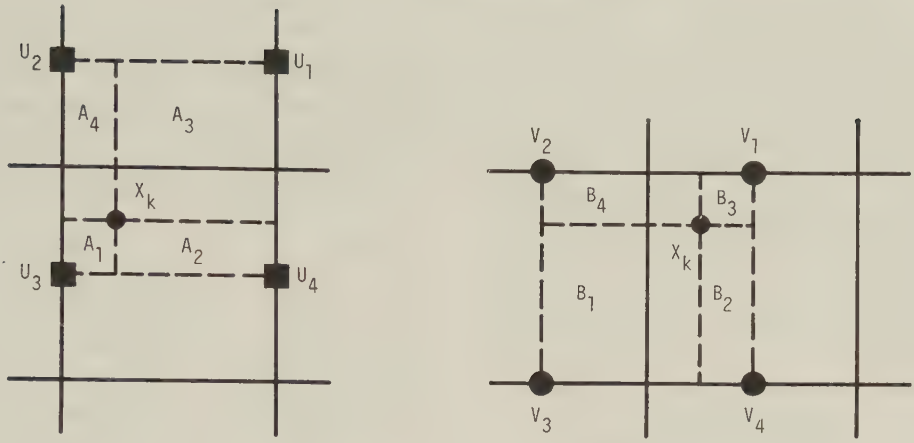
本手法では，(35)，(36)，(39)式の手順を速度ダイヴァージェンス D の相対値 $D/|V|$ が全てのセルについてある収速定数 EPS より小さくなるまで繰り返す方法をとった。

3.5.9　マーカー粒子移動・水位変化

マーカー粒子 X_k の移動速度 u_k，v_k は X_k に最も近い四つの流速点における流速値の加重平均値とする（図12）。

$$\left.\begin{aligned}u_k&=\frac{A_1U_1+A_2U_2+A_3U_3+A_4U_4}{\delta x\cdot\delta y}\\v_k&=\frac{B_1V_1+B_2V_2+B_3V_3+B_4V_4}{\delta x\cdot\delta y}\end{aligned}\right\} \tag{40}$$

このとき，マーカー粒子 X_k の現在の座標値を（x_k，



(a) u_k　　(b) v_k

図 12　マーカー粒子移動

Area-velocity weighting scheme for u_k and v_k, with particle X_k, shown for each quadrants of cell

y_k）とすれば，δt 時間後の X_k の座標値（x_k^{n+1}, y_k^{n+1}）は，

$$x_k^{n+1}=x_k+u_k\cdot\delta t\,;\ y_k^{n+1}=y_k+v_k\cdot\delta t \qquad (41)$$

で与えられる。

水位変化は(10)式を差分近似した(42)式で求める。

$$h_i^{n+1}=h_i+\delta t\left(v_h-u_h\frac{h_{i+1}-h_{i-1}}{2\delta x}\right) \qquad (42)$$

ここに，u_h, v_h は h_i における流速成分で(40)式と同様にして求められる。

3.5.10　自由表面・固定壁面での流速処理

(1)　EMP セルに面した SUR セルの流速

SUR セルの流速のうち EMP セルに面していない点での値は基礎方程式から求められる。しかし，EMP セルに面した流速点（図10中の黒丸）ではそれができないので，少なくとも連続の式を満たすように算出する。

SUR セルと EMP セルとの位置関係は図10に示す15通りが考えられる。（ただし，水位を変数として用いた場合は，そのうち２，３，６，７の４通りのみとなる。）各々の場合について，次に示す a ～ h の式から流速値を算定する。

a．$u_{i+\frac{1}{2},j}=u_{i-\frac{1}{2},j}-\dfrac{\delta x}{\delta y}(v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}})$　(43)

b．$v_{i,j+\frac{1}{2}}=v_{i,j-\frac{1}{2}}-\dfrac{\delta y}{\delta x}(u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j})$　(44)

c．$u_{i+\frac{1}{2},j}=u_{i-\frac{1}{2},j}$　(45)

d．$u_{i-\frac{1}{2},j}=u_{i+\frac{1}{2},j}+\dfrac{\delta x}{\delta y}(v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}})$　(46)

e．$u_{i-\frac{1}{2},j}=u_{i+\frac{1}{2},j}$　(47)

f．$v_{i,j+\frac{1}{2}}=v_{i,j-\frac{1}{2}}$　(48)

g．$v_{i,j-\frac{1}{2}}=v_{i,j+\frac{1}{2}}+\dfrac{\delta y}{\delta x}(u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j})$　(49)

h．$v_{i,j-\frac{1}{2}}=v_{i,j+\frac{1}{2}}$　(50)

なお，図中の番号と使用する式との対応関係を次に示す。

図10中の図番号	使用する式
1，5，11，13，15	a
2，7，10，14	b
3	c，f
4	d
6	e，f
8	g
9	c，h
12	e，h

(2)　SUR セルに隣接した EMP セルの流速処理

SUR セルが２つ以上連続して隣合せに並んだ場合には，計算の都合上そのすぐ外側の接線流速を算定しておく必要がある。その値は，自由表面における接線方向の応力条件式(17)から求められる。

例として，図13の b の場合を考えてみる。(17)式より

$$\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{2}{n_xm_y+n_ym_x}\left(n_xm_x\frac{\partial u}{\partial x}+n_ym_y\frac{\partial v}{\partial y}\right)-\frac{\partial v}{\partial x} \qquad (51)$$

であるが，水面コウ配を θ とすると，$n_x=-m_y=-\sin$

θ，$n_y = m_x = \cos\theta$ であるから，

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{2\sin\theta\cos\theta}{\cos^2\theta - \sin^2\theta}\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) - \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$= \tan 2\theta\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial v}{\partial x} \qquad (52)$$

となる。ただし，水位変数 h を用いない場合は水面コウ配 θ は0と見なさざるを得ないので

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \qquad (53)$$

となる。

① 水位変数 h を用いる場合はｂのみ考慮すればよい。

$$u_{i+\frac{1}{2},\,j+1} = u_{i+\frac{1}{2},\,j} + \delta y \cdot \tan 2\theta \cdot \left(\frac{u_{i+\frac{3}{2},\,j} - u_{i-\frac{1}{2},\,j}}{2\delta x} - \frac{v_{i,\,j+\frac{1}{2}} - v_{i,\,j-\frac{1}{2}} + v_{i+1,\,j+\frac{1}{2}} - v_{i+1,\,j-\frac{1}{2}}}{2\delta y}\right)$$

$$-\frac{\delta y}{\delta x}\left(v_{i,\,j+\frac{1}{2}} + v_{i-1,\,j+\frac{1}{2}}\right) \qquad (54)$$

② 水位変数 h を用いない場合は次の通り。

(i) ａの場合

$$v_{i+1,\,j+\frac{1}{2}} = v_{i,\,j+\frac{1}{2}} - \frac{\delta x}{\delta y}\left(u_{i+\frac{1}{2},\,j+1} - u_{i+\frac{1}{2},\,j}\right) \qquad (55)$$

(ii) ｂの場合

$$u_{i+\frac{1}{2},\,j+1} = u_{i+\frac{1}{2},\,j} - \frac{\delta y}{\delta x}\left(v_{i+1,\,j+\frac{1}{2}} - v_{i,\,j+\frac{1}{2}}\right) \qquad (56)$$

(iii) ｃの場合

$$v_{i-1,\,j+\frac{1}{2}} = v_{i,\,j+\frac{1}{2}} + \frac{\delta x}{\delta y}\left(u_{i-\frac{1}{2},\,j+1} - u_{i-\frac{1}{2},\,j}\right) \qquad (57)$$

(iii) ｄの場合

$$u_{i+\frac{1}{2},\,j-1} = u_{i+\frac{1}{2},\,j} + \frac{\delta y}{\delta x}\left(v_{i+1,\,j-\frac{1}{2}} - v_{i,\,j-\frac{1}{2}}\right) \qquad (58)$$

(3) 壁面境界での流速処理

壁面境界条件（**3.4.1** 参照）により，壁面での流速を求める。例えば，底面滑面境界の場合には(13)式を用いる。

3.5.11　渦動粘性係数モデル

通常，粘性流体の計算では簡単のために粘性係数を時間的・空間的に一定とおくことが多い。本研究においてもそのように一定として計算したものもあるが，乱流を加味して格子網スケール渦動粘性係数モデルを導入した計算も行っている。この場合，粘性係数は時間的・空間的に変化する。

用いたモデルは Smagorinsky-Deardorff モデルとよばれるもので，次のようにして格子網スケール渦動粘性係数（Sub-Grid Scale eddy coefficient）を決定する[49)50)]。

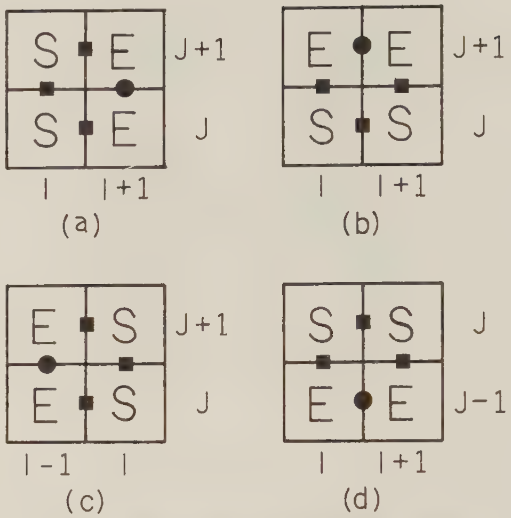


図 13　接線方向流速を求める時のセル配置

注）●印は求めるべき流速点を，■印はその算出に用いる流速点を各々示す。

Free surface orientations considered in satisfying the tangential stress condition

$\bar{u}(t)$，$\bar{v}(t)$ を格子網スケールでの空間的平均流速，$\overline{u'v'}(t)$ を格子網スケールでの平均により生じる Reynolds 応力とすれば，Boussinesq の渦動粘性係数の考え方を拡張して，

$$-\overline{u'v'}(t) = -K(x, y, t)\left(\frac{\delta\bar{u}}{\delta y} + \frac{\delta\bar{v}}{\delta x}\right) \qquad (59)$$

$$-\overline{u_i' u_j'} - \tfrac{1}{3}\delta_{ij}\overline{u'_l u'_l} = -K\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad (60)$$

ここに，K は格子網スケール渦動粘性係数である。(59)式は(60)式の一成分を例示したものである。また，エネルギー逸散率 ε は

$$\varepsilon = \tau_{ij}\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} = K\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad (61)$$

と表わされる。なお，(60)，(61)式には Einstein の総和規約が適用される。

一方，格子網は Kolmogorov の $-{}^5/_3$ 乗則に従う慣性領域にあるものとすれば，

$$S(k) = \alpha\varepsilon^{\frac{2}{3}}k^{-\frac{5}{3}} \qquad (62)$$

（α は普遍定数）

となる。ここに，S は波数スペクトル，k は波数である。上式を k に関して k_Δ～∞ すなわち，$2\pi/\Delta$～∞ の範

囲で積分すると

$$\overline{u'^2}=\frac{3}{2}\alpha\varepsilon^{\frac{2}{3}}k_J^{-\frac{2}{3}}=\frac{3}{2}\alpha\left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{2}{3}}\varepsilon^{\frac{2}{3}}\varDelta^{\frac{2}{3}} \tag{63}$$

となる。ここに，$\varDelta$は格子間隔である。したがって，格子網スケール渦動粘性係数は，乱れの強さと格子スケールとから定まると考えると，次元解析により，

$$K(x,y,t)=\sqrt{\overline{u'^2}}\cdot\varDelta=C^{\frac{4}{3}}\varepsilon^{\frac{1}{3}}\varDelta^{\frac{4}{3}} \tag{64}$$

であるが，(61)式を考慮して

$$K(x,y,t)=(C\varDelta)^2\left\{\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{65}$$

と表わされる。ここに，$C=\left(\frac{3}{2}\alpha\right)^{\frac{3}{8}}\left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{1}{4}}$。

(65)式を二次元で差分表示すると

$$\begin{aligned}K_{i,j}=(C\varDelta)^2\Bigg\{&2\left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x}\right)^2\\&+2\left(\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta y}\right)^2\\&+\frac{1}{4}\left(\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}-u_{i+\frac{1}{2},j}}{\delta y}\right)^2\\&+\frac{1}{4}\left(\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i-1,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}+\frac{u_{i-\frac{1}{2},j+1}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta y}\right)^2\\&+\frac{1}{4}\left(\frac{v_{i,j-\frac{1}{2}}-v_{i-1,j-\frac{1}{2}}}{\delta x}+\frac{u_{i-\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j-1}}{\delta y}\right)^2\\&+\frac{1}{4}\left(\frac{v_{i+1,j-\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}+\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j-1}}{\delta y}\right)^2\Bigg\}^{\frac{1}{2}}\end{aligned} \tag{66}$$

となる31)。ここに，$C=0.21$，$\varDelta=(\delta x\cdot\delta y)^{\frac{1}{2}}$である。

3.6　計算安定条件

差分格子網を用いる計算の周知の安定条件

$$u_{\max}\cdot\delta t<\delta x \tag{67}$$

は必ず満たさねばならない。

Hirt52) は MAC 法における計算安定条件として，さらに次の2条件を示している。

$$\nu>\frac{1}{2}u_{\max}{}^2\cdot\delta t \tag{68}$$

$$\nu>\frac{1}{2}\left(\frac{\delta u}{\delta x}\right)_{\max}\cdot\delta x^2 \tag{69}$$

(68)，(69)式はそれぞれ線型安定性，非線型安定性に対応する。ただし，Hirt はこの2条件は“a useful rule of thumb” であるとしている。レイノルズ数の大きな流れになると，これらの条件を満たすことは計算の経済上容易ではない。実際，Hirt の計算例は必ずしもこの2条件を満たしていない。局所的に条件を満たさない領域が存在しても，その範囲が時間的・空間的にごく限られているならば，計算結果の大勢に影響はないようである。しかし，厳密な議論を特に必要とする場合には，これらの条件を必ず満足させておくべきである。なお，渦動粘性係数モデルの導入は，これらの条件を容易に満足させるために有効である。

また，自由表面における境界条件の与え方も計算安定性にきわめて重要な役割をもっている。自由表面での境界条件の与え方等の改良が行われているのは，その物理的・数学的厳密化に加えて，計算の安定性を増すためでもある31)。

4.　水理実験方法

本章では，Densimetric Exchange Flow に関する著者の実験方法・装置・条件等を述べる。

4.1　実験方法

矩形断面滑面水平水路の途中をゲート（隔板）で仕切り，その両側に淡水および塩水を貯留する。流体を十分静止させたのち，ゲートを急開放し，流れ（Densimetric Exchange Flow）を生じさせる。下層流先端部の流れの様子を8 m/m カメラで撮影し，フィルム解析によって，その流動に関する諸特性量を求める。

なお，貯留水深 H_0，相対密度差 ε，貯留長（淡水側 L_1，，塩水側 L_2）を各々何通りかに変えて実験を行い，それぞれの因子が先端部の流動に及ぼす影響を吟味する。

4.2　実験装置

実験に使用した矩形断面滑面水平水路は，長さ300 cm，幅20 cm，高さ50 cmで片面アクリル製である。（写真1，図14）

水路中央にゲート（鉄板，厚さ2 mm）を設け，その

写真1　実験装置

Experimental flume

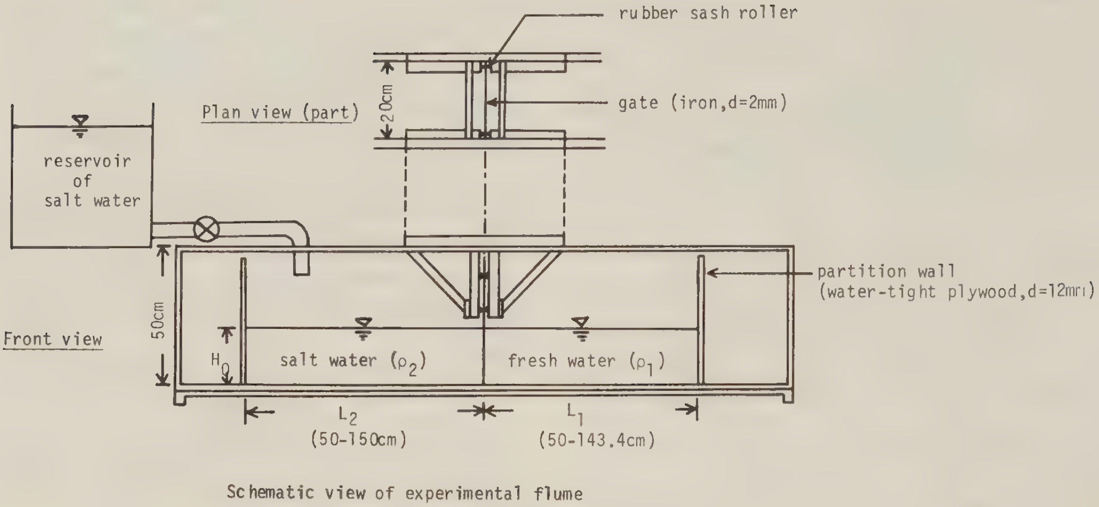

rubber sash roller
Plan view (part)
20cm
gate (iron,d=2mm)
reservoir of salt water
partition wall (water-tight plywood,d=12mm)
Front view
50cm
H_0
salt water (ρ_2)
fresh water (ρ_1)
L_2 (50-150cm)
L_1 (50-143.4cm)
Schematic view of experimental flume

図 14　実験水路模式図
Schematic view of experimental flume

両側に適当な貯留長で塩水，淡水を貯留する。両側の隔板には耐水ベニヤ合板（厚さ12mm）を使用し，パテで固定した。ゲートは手動で滑らかに引上げられる様，支持枠の8個のゴム戸車で支えられている。また，鉄板が水路底面および壁面に接する部分については，水密性を保つため鉄板のその部分にパテを少量塗布しビニールテープで被覆した。なお，流れへの影響を極力少なくするため水路壁面にはゲート案内の溝はつけられていない。支持枠のゴム戸車によって鉛直に維持案内される。実験装置の製作に際して，著者が最も工夫したのはこの点である。

貯留水深はゲート支持枠によって流れが影響されないように，最大20cmとする。貯留長は両側の隔板の設置位置で調節される。

塩水は，あらかじめ一定濃度の塩水を塩水貯留タンクに貯えておき，そこから水路へ供給する*。淡水には水道水を使用した。なお，塩水は食紅（赤色102号または104号）で着色した。

塩水および淡水の密度・温度はそれぞれ比重計・棒状温度計で測定した。

4.3　実験条件

貯留水深 H_0 を5，10，20cmの3通り，相対密度差 ε を0.01，0.02，0.03の3通り，貯留長（淡水側 L_1cm，塩水側 L_2cm）を（50，50），（150，50），（100，100），（150，143.4）の4通りとした。これらを組合せて計36通りについて実験を行った。その一覧表を資料1に示す。

4.4　データ解析方法

下層流先端部の形状や移動距離は，撮影したフィルムを8m/mフィルム編集機にかけて，その時々刻々の変化を読取った。また，移動速度は移動距離の時間変化から算出した。

このようにして先端部の諸特性量の時間変化を十分考慮して解析を行った。この点は従来の実験にはなかった特色である。

なお，使用した8m/mカメラの撮影速度は毎秒18コマである。また，コマ送り速度の変動誤差は±0.5％以内であり，実験値への影響はほとんどないものと考えてよいであろう。

5.　結果とその考察

本章では，数値解析結果と水理実験結果を報告し，それらに基いて，下層流先端部の水理特性に関する考察ならびに数値解析手法の検証を行う。

5.1　流れの概略

ゲートを瞬間的に開放すると，塩水の方が淡水よりも比重が大きいので，塩水は淡水の下へもぐり込み，下層流となって進行する。逆に淡水は塩水の上へ上層流となって進行する。

＊ 実験中の供給はない。

H_0: Initial depth of storage

L_1, L_2: Horizontal length of storage of fresh water and salt water

ρ_1, ρ_2: Density of fresh water and salt water

u_f: Velocity of front

x_f: Position of front

h_1, h_2: Water level at right and left end of the flume

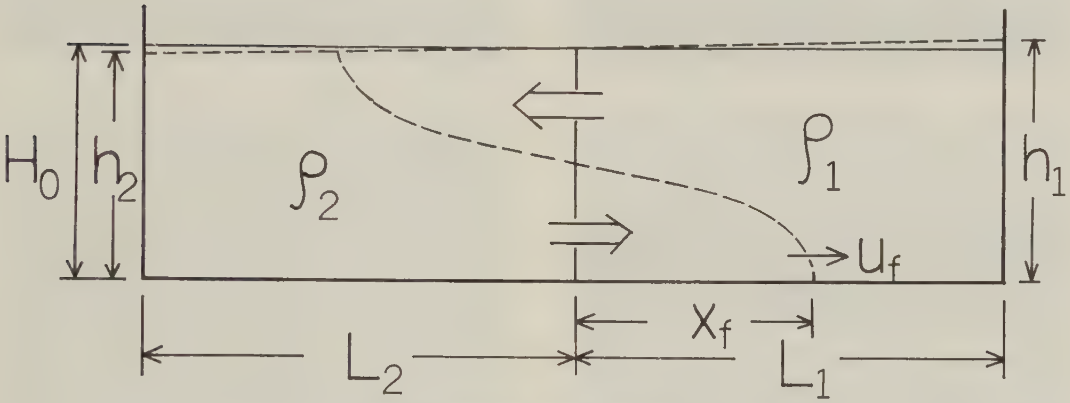


図 15 流れの模式図と主な記号

Densimetric Exchange Flow and the symbols

流れの発生とともに先端部は直ちに形成され始め，二次元的にほぼ一定の界面形状が認められるようになる。また，先端部に続く部分はほぼ一定の界面水深を保ち準定常的な流れとなっている。

図15に流れの模式図と主な記号を示す。また，図16は数値解析例，写真 2 は水理実験例である。

なお，H_0：初期貯留水深，L_1，L_2：淡水，塩水の貯留長，ρ_1，ρ_2：淡水，塩水の密度，u_f：先端の移動速度，x_f：先端の移動距離，h_1，h_2：淡水側，塩水側の水路末端壁面水位，である。

先端部付近の形状は図17のようになり，先端部に続く部分が直ちにほぼ一定の界面水深となる場合と，一度極大値を経てから一定界面水深となる場合とがある。先端部の厚さ d はいずれの場合も最大厚さをとっている。

5. 2 主な記号と無次元化

主な記号を図15に示した。本章では以下無次元化を行って結果を示すことが多い。代表長には初期貯留水深 H_0，代表速度には$\sqrt{\varepsilon g H_0}$ を用いる。ここで，ε は相対密度差で $\varepsilon=(\rho_2-\rho_1)/\rho_2$ である。すなわち，

$$\left.\begin{aligned} x' &= x/H_0 \\ u' &= u/\sqrt{\varepsilon g H_0} \\ t' &= \frac{\sqrt{\varepsilon g H_0}}{H_0}\,t \end{aligned}\right\} \qquad (70)$$

として長さ，速度，時間を無次元化する。なお，よく用いる記号として次の二つがある。

① 先端部の平均移動速度：$\bar{K}=\bar{u}_f/\sqrt{\varepsilon g H_0}$ (71)

（ここで上付きバーは時間平均を示す。）

② 内部レイノルズ数：$R_e=H_0\cdot\sqrt{\varepsilon g H_0}/\nu$ (72)

また，場合によっては代表長に先端部の最大厚さ d，代表速度に $\sqrt{\varepsilon g d}$ を用いることもある。例えば，

$$\bar{K}_d=\bar{u}_f/\sqrt{\varepsilon g d} \qquad (73)$$

$$Re_d=d\cdot\sqrt{\varepsilon g d}/\nu \qquad (74)$$

などである。

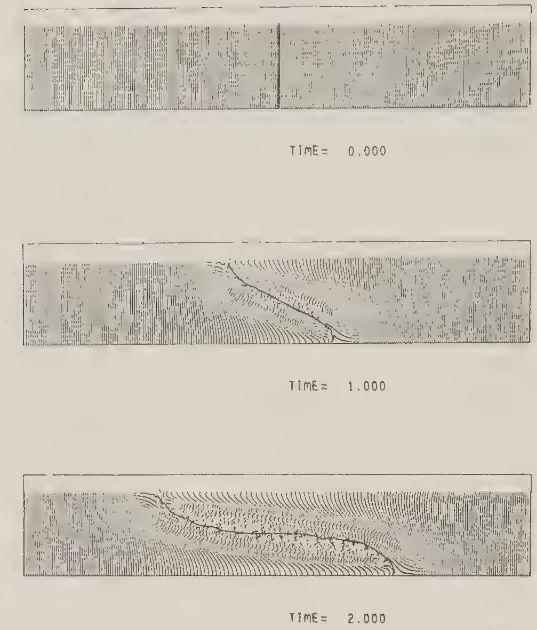
5. 3 形状特性

5. 3. 1 水理実験結果

先端部の二次元的界面形状（以下，先端形状という）は，ほぼ一定となってからも若干の変化がみられる。ただし，実験においては三次元的に非定常な変化もあるため[14)15)55)]，必ずしも明瞭な変化傾向は把握し難い。しかし，たとえば図18に一例を示すように，

① 進行につれて若干平たくなる傾向，

② 進行につれて，底面とのなす角がわずかながら小さ



RUN.DC013　(t=0.0, 1.0, 2.0 sec, δt=0.01 sec, $\delta x=\delta y$=1 cm, H=10 cm, $L_1=L_2$=30 cm, ρ_1=1.00, ρ_2=1.03 g/cm³, g_x=0.0, g_y=−980.0 cm/sec², μ=1.0 g/cm·sec)

図 16　流れの様子（数値解析例）
Densimetric exchange flow
（numerical simulation）

くなる傾向，

③　最先端は，底面境界層の影響により，底面から少し離れた高さに位置するが，その高さが進行につれてわずかながら低下する傾向，

などが認められるようである。なお，図18はこれらの傾向を示す典型例であって，必ずしもこれらの傾向が全面的に認められたのではない。また，実験条件による差は，本実験の範囲内では明確ではなかった。これらの変化を十分考慮した上で平均形状を求めた。その結果を図21に示す。

5. 3. 2　数値解析結果

先端形状は一定形状に達したのち，ほぼ同一形状を保っている（図19）。また，計算条件による差はほとんどなく，ほぼ一定形状と考えてよい（図20）。なお，Free-slip 条件で計算しているため，底面境界層の影響はあらわれていない。

5. 3. 3　考　察

(1)　従来の実験値との比較

図21は先端部の二次元的平均界面形状について，著者の実験結果と従来の実験結果を比較したものである。Middleton[11]や Keulegan[13]は著者とほぼ同じ結果を得ていた。Middleton はレイノルズ数（彼は先端部でのレイノルズ数 $Re_d \equiv d\cdot\sqrt{\varepsilon g d}/\nu$ を指しているものと思われる）が大きいほど平たく長い形状になることが推測されると述べている。レイノルズ数は著者の方が Middleton より若干小さいが，ほぼ同じオーダー（10^3）である。Keulegan については文献が未公刊のため明らかでないが，Middleton によれば，彼よりも若干大きい値である。

なお，Ippen・Harleman の結果は緩勾配水路の流下流先端部の形状である（Re_d は10^2 のオーダー）。平野・羽田野[53]は，流下流の場合について，Re_d が10^3〜1.5×10^3 の範囲で著者や Middleton, Keulegan とほぼ同じ形状を得ている。したがって，先端部の無次元平均形状がレイノルズ数に影響されると考えることが可能とも思われる。しかし，同一実験内においても図18に示したような形状変化を伴うことが本研究にて明示されている。また，Ippen・Harleman の結果のみがかけ離れた形状であるので，レイノルズ数の影響を吟味するには，さらに検討を要する。

本研究では，実験中の形状変化をも十分考慮して無次元平均形状を求めたが，レイノルズ数の影響は顕著には認められなかった。

(2)　解析結果と実験結果との比較

図22は先端部の二次元的平均界面形状について，ほぼ同一条件下における解析結果と実験結果とを比較した例である。底面境界層の影響によるわずかな相違を除いて，きわめて良く一致しており，解析手法の有効性の一

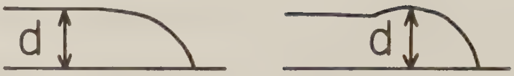


図 17　先端部の厚さ d
Definition of d, the thickness of the head

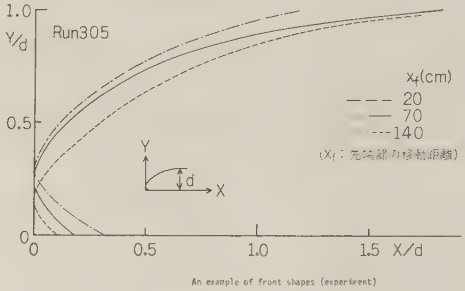


図 18　先端部界面形状（実験例）
An example of front shapes（experiment）

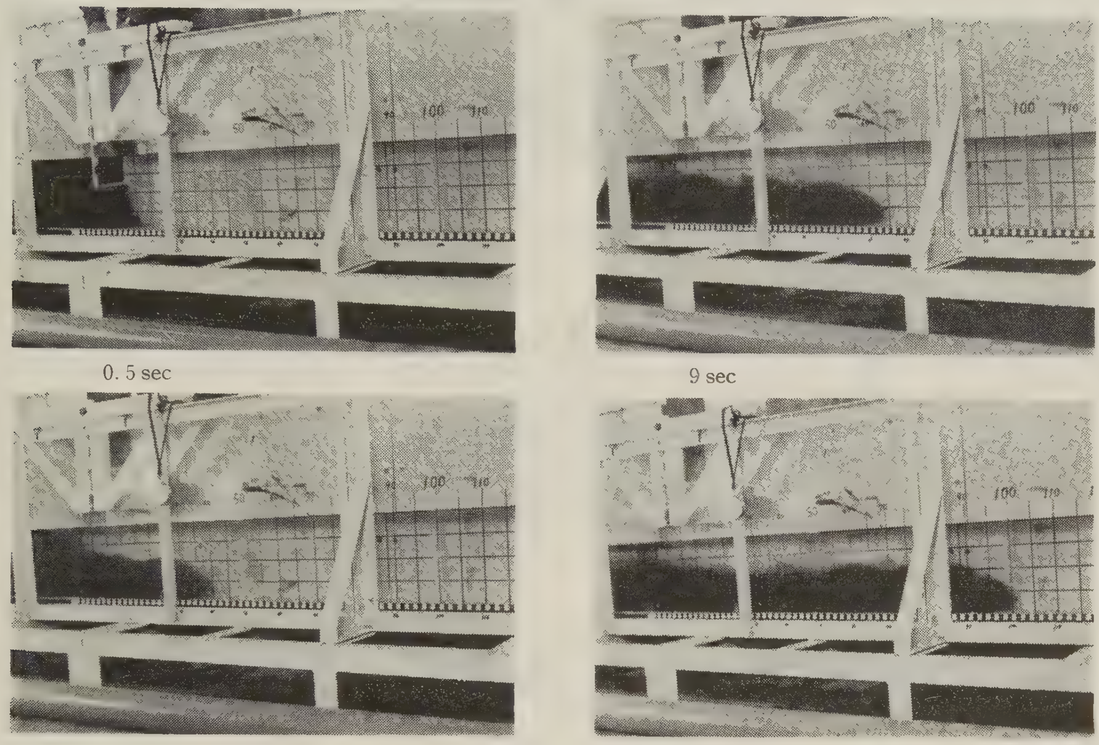

0. 5 sec　9 sec　4. 5 sec　15 sec

写真２　流れの様子（水理実験例）

Densimetric Exchange Flow (experiment, Run 112-1)

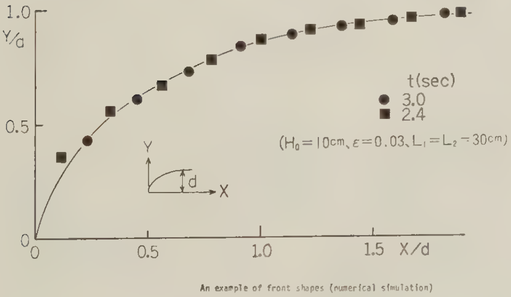


図 19　先端部界面形状（計算例）

An example of front shapes (numerical simulation)

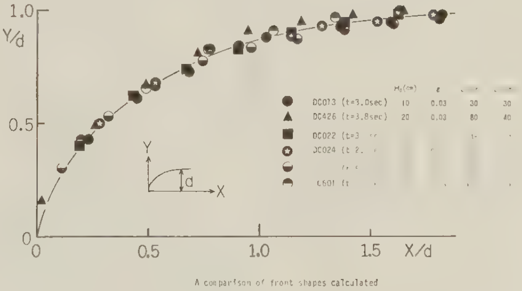


図 20　先端部界面形状（計算例の相互比較）

A comparison of front shapes calculated

つの検証となる。

なお，解析結果が時間によらずほぼ一定形状であるのは，計算が二次元で行われているために，実験におけるような三次元的な非定常変化の影響があらわれないからであると思われる。

5. 4　移動特性

5. 4. 1　水理実験結果・数値解析結果

(1)　移動距離

図23は，先端部の移動距離 x'_f の時間変化を示した一例である。図には実験結果と解析結果をあわせて示す。いずれも直線的な変化となっているが，詳細にみると時間的な変動がある。それは，移動速度の時間変化からより明確となる。

(2)　移動速度

先端の移動速度 u_f は若干周期的な変動をしながら，時間の経過につれてその振幅を減じてほぼ一定値に近づく。また，水路末端に近づくと急速に減衰する。これ

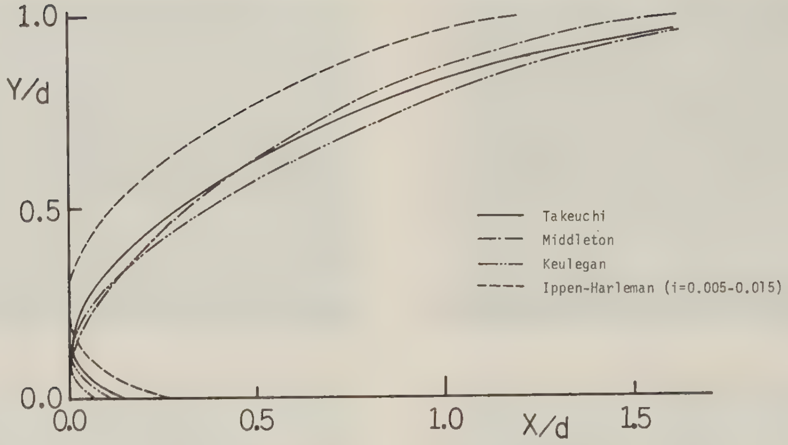
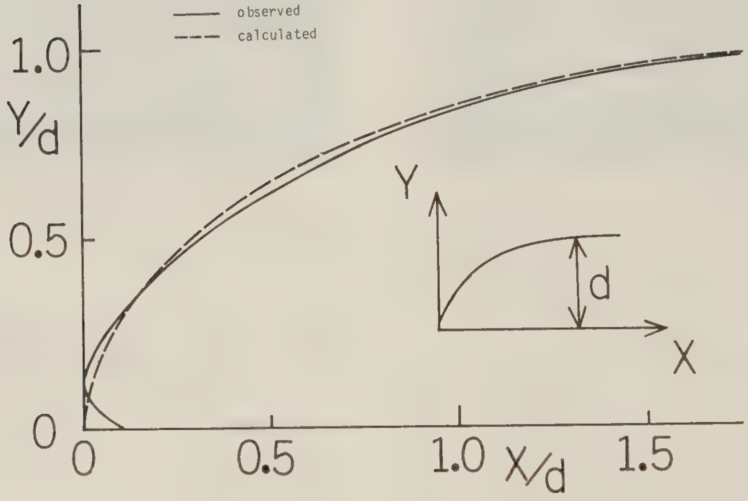


図 21　先端部界面形状（従来の実験値との比較）
A comparison of front shapes observed by Author and others



A comparison of front shapes observed and calculated

図 22　先端部界面形状（計算値と実験値との比較）
A comparison of front shapes observed and calculated

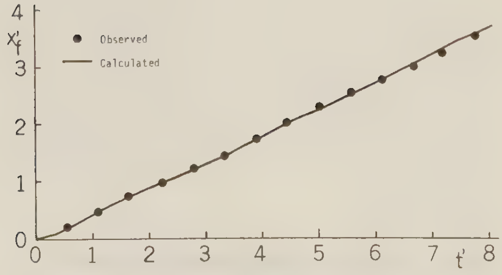


図 23　先端部移動距離の時間変化
Front position（x_f'） versus time（t'）

は，実験結果，解析結果とも同様であり，その例を図24，図25に示す。なお図中，実験値が欠けている部分は水路の鉄枠が障害となって先端部を撮影できなかったことによる。また，計算値は実験値との直接の比較のため，特にゲート開放過程を考慮した解析によるものである。

(3)　平均移動速度

Densimetric Exchange Flow の下層流先端部の移動速度は，Dam Break Wave との類推に立って，次のようにおかれる19)。

$$u_f = K\sqrt{\varepsilon g H_0}$$

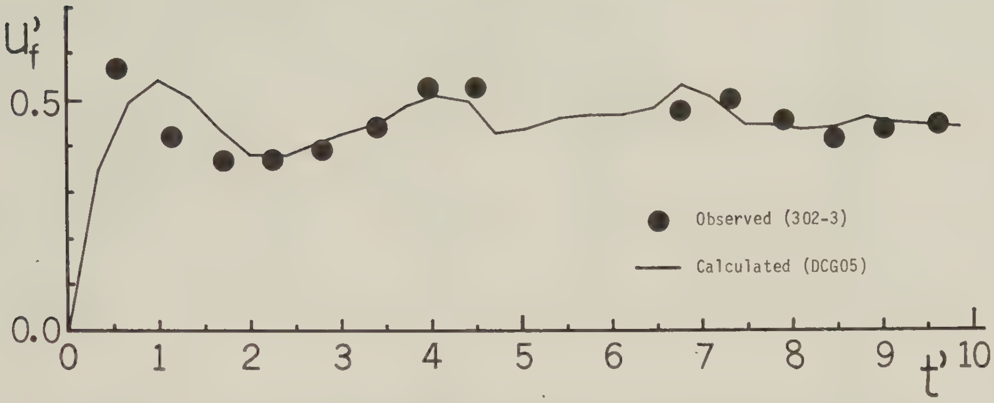


図 24　移動速度の時間変化（その 1）
Front velocity（u_f'）versus time（t'）

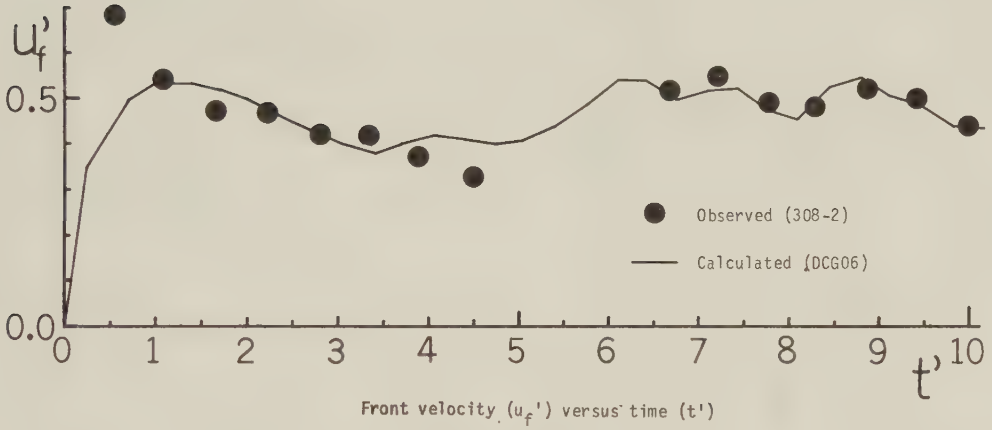


図 25　移動速度の時間変化（その 2）
Front velocity（u_f'）versus time（t'）

ここに，KはK値とよばれ，実験により定められるべき抵抗係数とされているが，これは無次元化された移動速度 u_f' に他ならない。以下，その時間平均値$\bar{K}$を

$$\bar{K}\equiv\bar{u}_f/\sqrt{\varepsilon g H_0} \qquad (76)$$

で定義し，無次元化された平均移動速度Kについて結果を示す。なお，従来K値として与えられているものの多くは，この$\bar{K}$（またはさらに集団平均した値）である。また，この値の算出にあたっては移動速度の時間変化特性を十分考慮せねばならない。むやみに平均をとっても無意味な値を得るであろう。

図26は実験結果を，相対密度差ε，初期貯留水深H_0で整理してみたものである。図中の縦棒は標準偏差を示す。εやH_0の増大につれても$\bar{K}$も増大していることがわかる。したがって両者を合わせて，内部レイノルズ数$Re\equiv H_0\cdot\sqrt{\varepsilon g H_0}/\nu$が大きくなるにつれて$\bar{K}$は若干増大する。

図27は$\bar{K}$とReとの関係を直接示したものである。図中には解析結果も示されている。実験結果，解析結果ともほぼ同じ傾向を示し，本研究の範囲内では，Reが大きいほどKも大きくなるといえる。

図28はゲート開放所要時間t'_Gが$\bar{K}$に与える影響を調べたものである。t'_Gが小さくなると$\bar{K}$は若干増大するように思われるが，その変化は小さい。

図29は，$\bar{K}_d\equiv\bar{u}_f/\sqrt{\varepsilon g d}$と先端部相対厚さ$d'=d/H_0$との関係を示したものである。$\bar{K}_d$と$d'$とは逆相関の関係にあることがわかる。

5.4.2　考　察

(1)　時間変動特性について

図24，図25の例に示されるように，移動速度は若干周期的ながらも非定常な変化をすることが，水理実験と数値解析の両面から明らかにされた。

この変化は，初期流れの発生に伴って生ずる微小表面

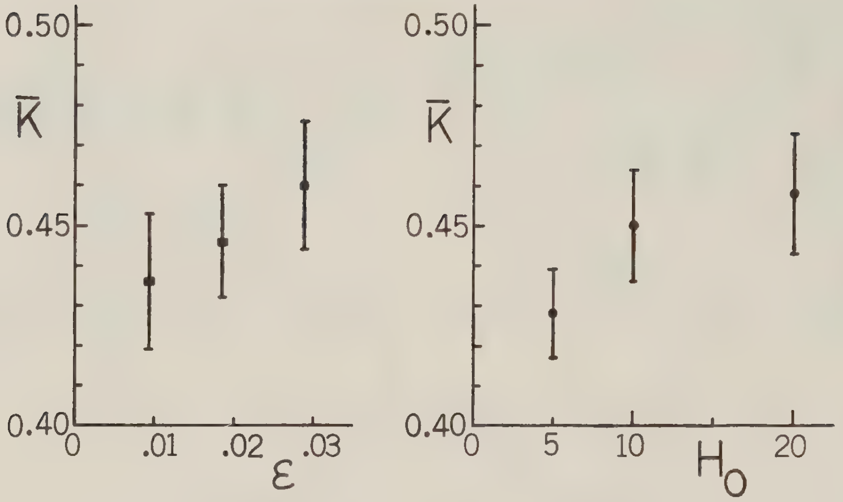


図 26　平均移動速度 K と相対密度差 ε，初期貯留水深 H_0 との関係（実験結果）

Average velocity of front（$\bar{K}$）against relative density（ε）and initial depth of storage（H_0）

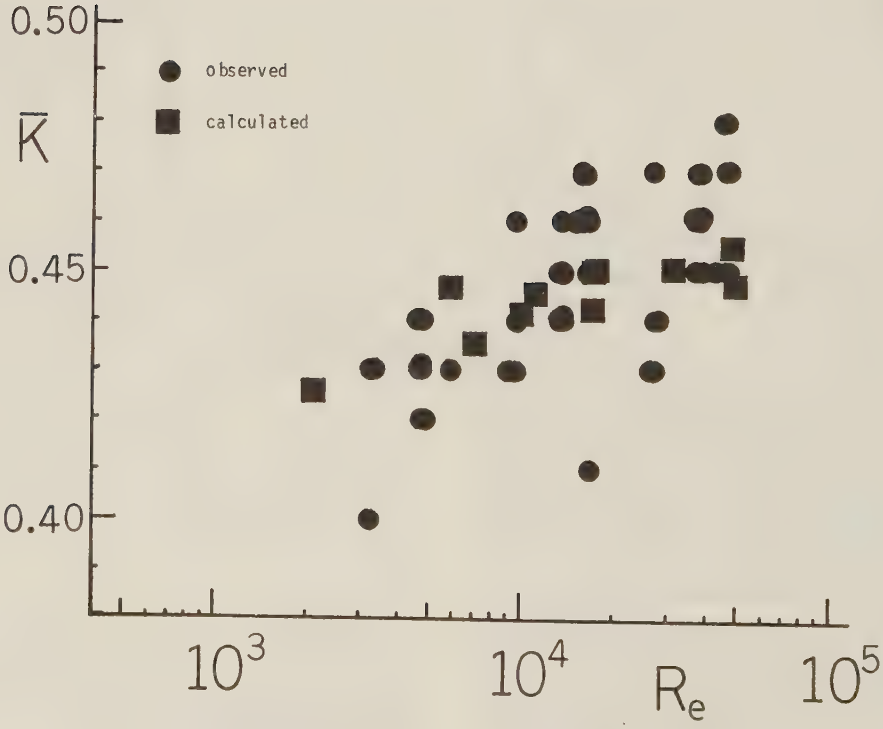


図 27　平均移動速度 $\bar{K}$ とレイノルズ数 Re との関係

Average velocity of front（$\bar{K}$）against the Reynolds number（Re）

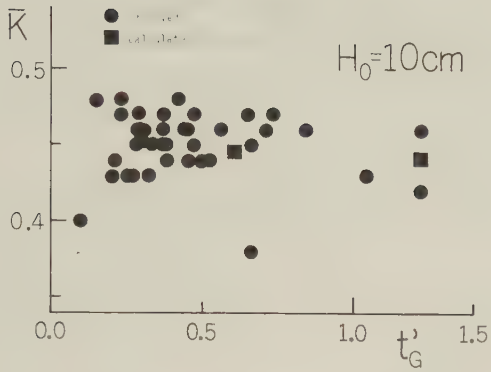


図 28　平均移動速度 $\bar{K}$ とゲート開放所要時間 t_G との関係

Average velocity of front ($\bar{K}$) against the time required for gate opening (t'_G)

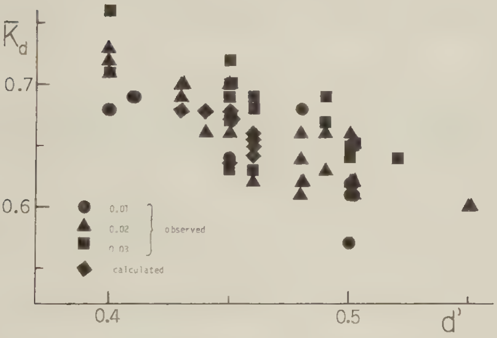


図 29　平均移動速度 K_d と先端部相対厚さ d' との関係

Average velocity of front ($\bar{K}_d$) against the relative thickness of the head (d')

波や密度差による流れの影響を受けて，水面勾配に非定常な微小変化のあること（**5. 6** 参照）が大きな原因と考えられる。なお，実験においては渦の間欠的放出による影響も考えられようが，実験結果と解析結果が極めて良く一致していることから，その影響は小さいと推測される。

ところで，どのような因子が時間変動特性に影響しているのだろうか。図 30～32 は解析結果の相互比較によってそれを調べたものである。時間変動周期は貯留長（L_1，L_2）や貯留水深 H_0 によって異なるが，相対密度差 ε にはよらないようである。このことは，表面波の伝播・反射の影響が大きいことを示唆するが，先端部の移動につれて位相差もみられるので，水位変化とも合わせてさらに詳細に検討する必要があろう。

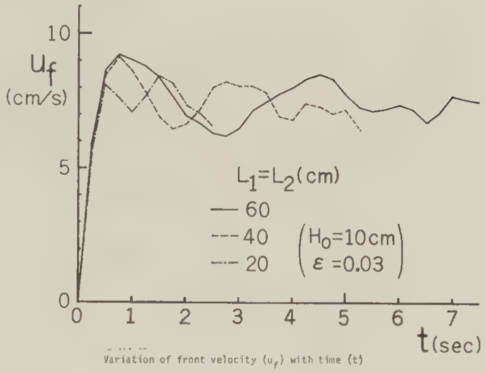


図 30　移動速度 u_f の時間変化（計算値 1）

Variation of front velocity (u_f) with time (t)

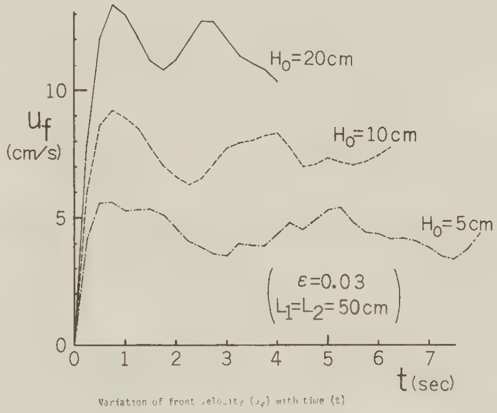


図 31　移動速度 u_f の時間変化（計算値 2）

Variation of front velocity (u_f) with time (t)

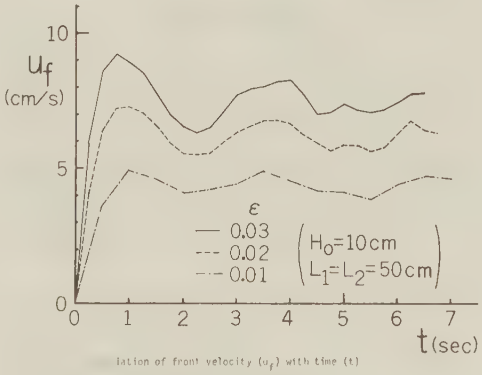


図 32　移動速度 u_f の時間変化（計算値 3）

Variation of front velocity (u_f) with time (t)

なお，室田・神田[19]のデータを再整理してみると，図33に示すように著者の結果とほぼ類似の変動がみられる例がある。残念ながら，室田らはこの点に注意を払わなかったようである。

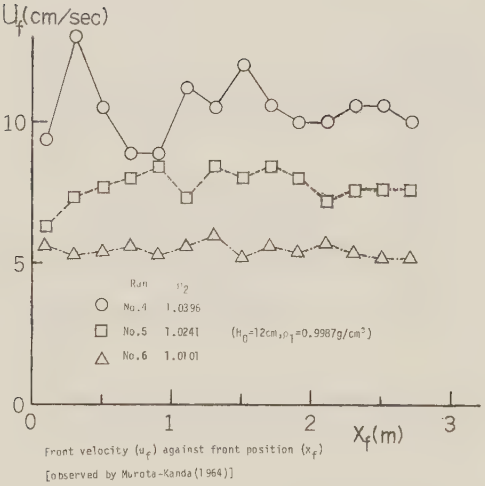


図 33　移動速度 u_f の変化〔室田・神田（1964）の実験値〕

Front velocity (u_f) against front position (x_f)〔observed by Murota・Kanda(1964)〕

また，平野・羽田野[53)]の流下流先端部の実験結果にも時間変動がみられており，移動速度の非定常変化は，密度流先端部のもつ一般的特性と思われる。今後，その原因を十分に究明する必要があろう。

ともあれ，本研究により，先端部の移動速度の時間変化特性が初めて詳細に把握されたことの意義は大きいと思われる。

⑵　平均移動速度について

①　従来の実験値の再吟味

従来得られている移動速度の実験値のほとんどは，平均値としての値である。しかし，前述の如く，移動速度は同一実験内においても非定常な変化を示すため，個々の実験における平均移動速度の算出にあたってはその時間変化特性を十分考慮する必要がある。従来，この点に十分考慮が払われていなかったようであり，既存データの大きな分散の一因はこの点に存しているものと考えられる。

Middleton[11)]や室田・神田[19)]は図２のように，きわめて分散した結果を得ていた。一方，著者は図27の結果を得た。著者のように，時間変化特性を十分把握した上で結果を整理すると，実験値の分散はかなり減少することがわかる。

従来，同一実験内の時間変化を十分把握するような実験は行われていないので，従来の実験値については，個々の実験での値の信頼性は低いと考えざるを得ない。

なお，いくつかの実験の全平均としての値，すなわち集団平均値としての平均移動速度が実験者にかかわらずほぼ同一であるのは，個々の実験値の分散のかなりの部分が，レイノルズ数による変動幅の中に含まれてしまうためと考えられる。

②　レイノルズ数の影響

図27より，本研究の範囲内においては実験値，計算値ともレイノルズ数が大きくなるほどKも大きくなる傾向が認められる。これは，本研究にて初めて明確に示されたものである。なお，計算値からはレイノルズ数がある程度まで大きくなると$\bar{K}$の増加傾向が頭打ちになるようにも思われる。

Barr[20)]は Re が10^6を超える範囲では，$\bar{K}$は Re に関係せずフルード相似則が成立するとしている。しかし，この点については本実験の範囲外なので検討できない。なお，レイノルズ数がきわめて大きい場合には，先端部での拡散混合を考慮した検討が必要になってくると思われる。

ところで，従来不明なままに残されていた$\bar{K}$と Re との相関を本研究にて初めて明確に把握し得た原因は，第１には先端部の移動速度の時間変化特性を十分考慮して平均移動速度$\bar{K}$を算出したこと，そのことによってデータの分散が小さくなったこと，第２には実験条件，解析条件を系統的に変化させて，従来よりも内部レイノルズ数 Re の広い範囲について実験と解析を行ったこと，にあろう。

③　その他の条件の影響

ゲート開放所要時間の影響については図28に示したように，本実験の範囲内では無視できるものと考えられる。

貯留長による影響について，本研究では系統的な傾向は認められなかった。

⑶　解析結果と実験結果との比較

図23～25，図27～29において，いずれの場合も解析結果は実験結果にきわめて良好に一致しており，解析方法の有効性が認められよう。

なお，図24，25において，ごく初期の部分で若干の不一致があるが，その原因は実験と解析とでゲート開放過程が必ずしも厳密には一致していないことにあると考えられる。

5.5　流況特性

5.5.1　数解値析結果

⑴　速度分布

流れ全体の速度分布の一例を図34に示す。

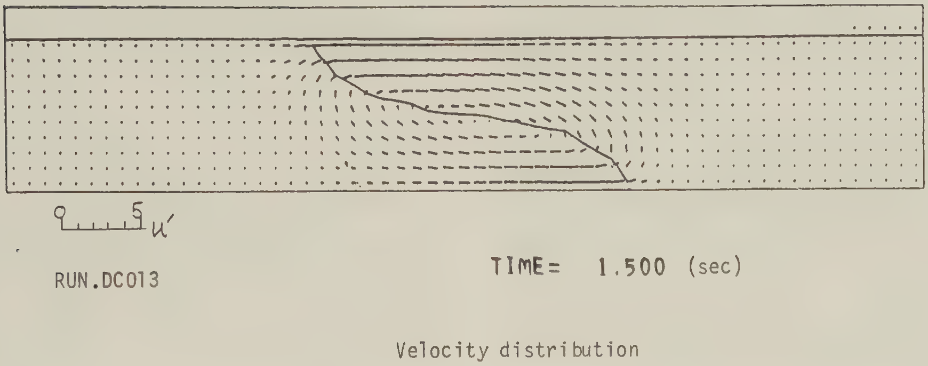


図 34 速度分布（計算例）
Velocity distribution

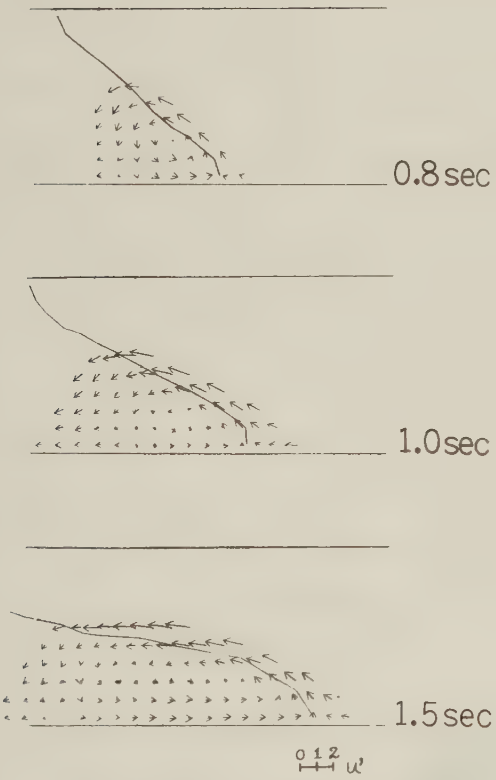


図 35 先端部の渦（先端移動速度で動く座標系からみた速度分布）
Vortex in front region observed in a coordinate system moving with the front velocity (numerical simulation, DC 13)

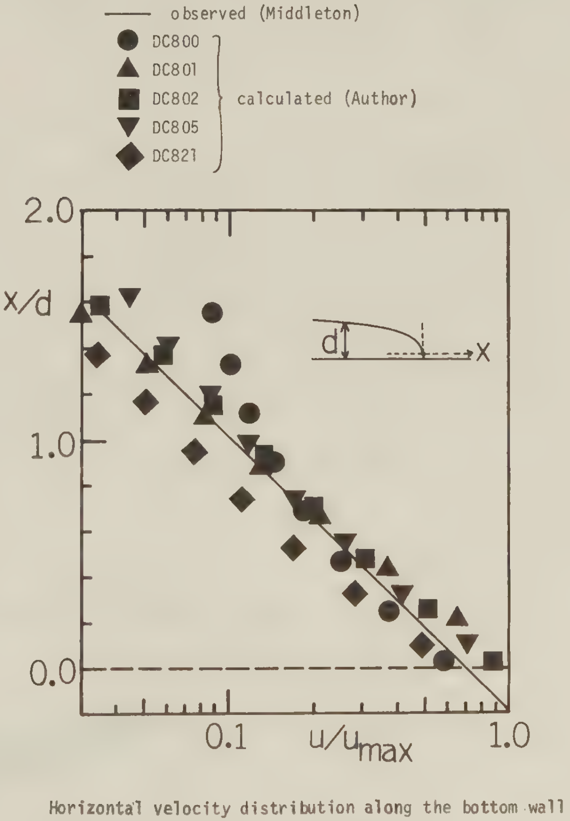


図 36 進行方向速度分布
Horizontal velocity distribution along the bottom wall

図35は先端部付近の速度分布を先端の移動速度で動く座標系からみたものである。先端部は渦を伴って流動しているのがわかる。また，底面付近（底面メッシュ）での進行方向速度分布を図36に示す。速度は先端部内の最大速度で無次元化してある。図中の x 軸は最先端を原点として進行方向にとられている。図より，最大速度（u

/$u_{\max}$＝1の点）は先端より内側に最大厚さ d の約0.2倍の位置で生じていることがわかる。また，横軸が対数目盛であるから，進行方向の速度分布は指数関数的に減少する分布となっている。

(2)　先端付近での鉛直速度成分

図37に示すように，先端メッシュ付近での鉛直速度成分 v_f は水平速度成分 u_f に対し約30～70%であり，その平均値は約50%であった。なお，レイノルズ数との相関は認められないようである。

(3)　圧力分布

圧力分布はほぼ静水圧分布とみなしてよい。結果の一例を図38に示す。

(4)　渦度分布

渦度分布の一例を図39に示す。渦度の大きい領域は内部境界面に沿って存在する。なお，渦度が最も大きい部分は上層流，下層流とも先端部付近の境界面の内側にある。

5.5.2　考　察

(1)　速度分布

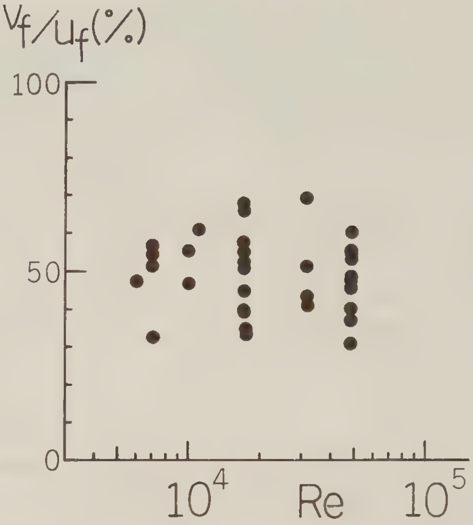


図 37　先端付近での鉛直速度成分

The ratio of vertical velocity to the horizontal velocity at the front

先端部は内部に渦を巻きつつ前進する。また，水理実験・数値解析のいずれにおいても，最先端付近の粒子が

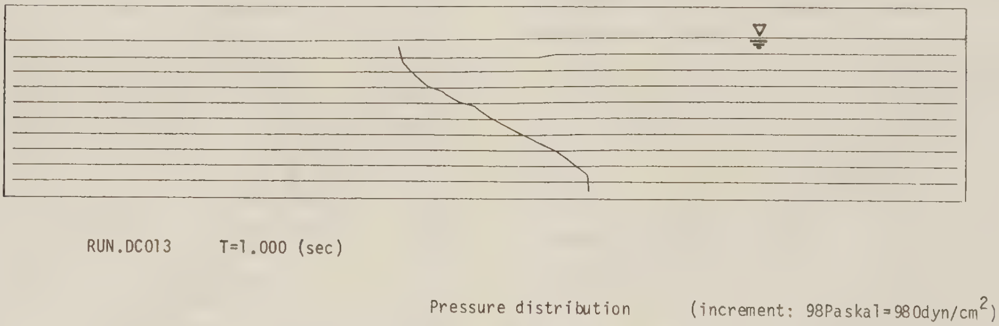


図 38　圧力分布（計算例）

Pressue distribution (increment: 98 Paskal=980dyn/cm)

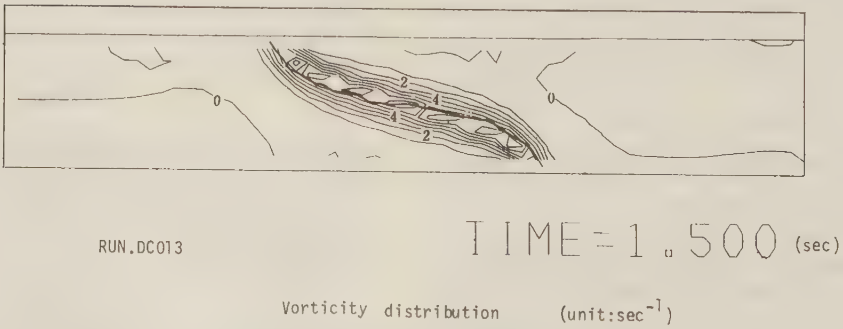


図 39　渦度分布（計算例）

Vorticity distribution (unit: sec^{-1})

渦によって巻き上げられる現象が見られた。これは，実際現象としての，先端部通過に伴う底質巻上げ現象を示唆するものである。

なお，実験においてはH_0が5 cmの場合を除いて，渦の間欠的放出が観察されている。しかし，渦の放出に関しては先端付近の流れの三次元性による寄与が大きいものと考えられ，二次元数値解析では表現されていない。

速度分布を水理実験で求めるのは容易ではないが，Middleton[11]は染料やトレーサー粒子を用いて，底面付近の進行方向速度分布を求めている。それと著者の解析結果との比較を図36に示す。実線がMiddletonの実験値の平均的傾向を示す。実験値と計算値とはほぼ良好に一致しており，同じ傾向を示している。また，この図から，最大速度は先端の内側，最大厚さの約20%の位置で生じていることがわかる。

なお，Middletonの実験値には10%程度の誤差はあるものとされている。また，著者の計算値にもメッシュ幅の制約から生ずる若干の近似誤差が含まれている（DC800は水路末端壁の影響を若干受けている）。

(2) 先端付近での鉛直速度成分

Simpson[14]によれば，大気中での実測値は水平速度成分との比で40〜60%程度である。著者の解析結果は30〜

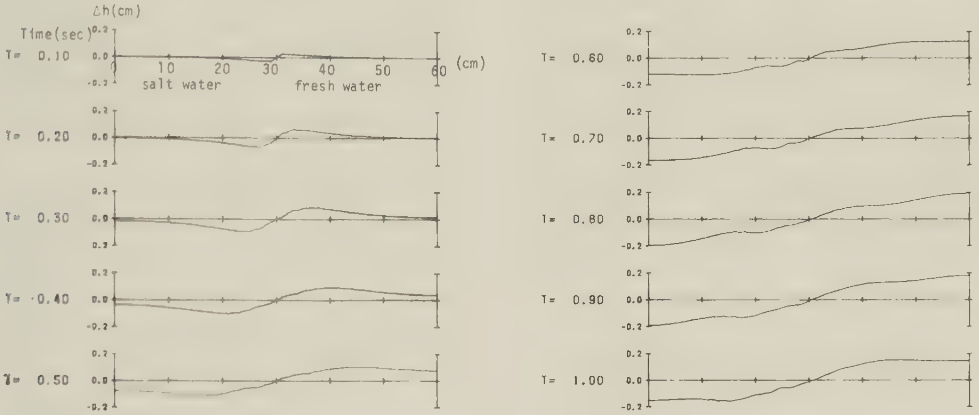


Fig.5-22 Profile of free surface (H_0=10cm,L_1=L_2=30cm,ε=0.03)

図 40 水位変化（計算例）

Profile of free surface（$H_0=10$cm, $L_1=L_2=30$cm, $\varepsilon=0.03$）

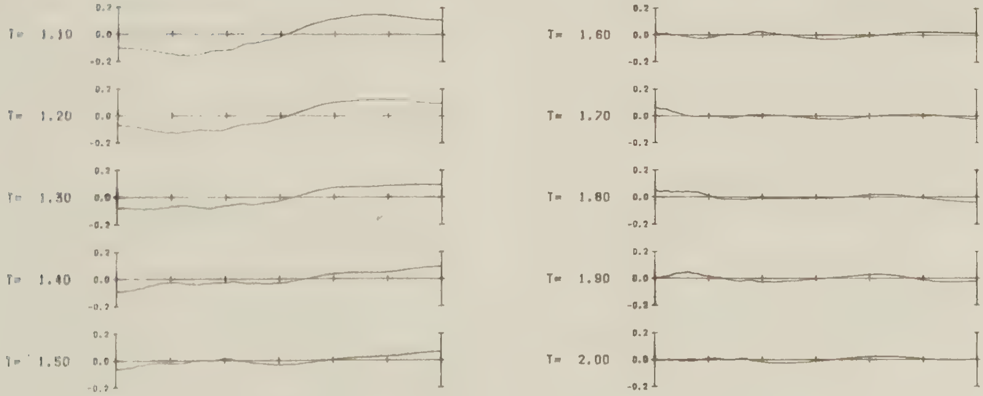


Fig.5-22 (continued)

図 40 （つづき）

(continued)

70%程度であったから，ほぼ同程度となっている。この値は，先端部での底質巻上げ現象を示唆するに十分な値である。なお，実測値がきわめて限られていることと，計算値についても計算メッシュ幅による近似誤差があるためメッシュ幅をさらに細かくすれば値の範囲が狭まる可能性があることに留意しておきたい。

5.6　水位変化

5.6.1　数値解析結果

流れの発生とともに，きわめて微小な量ではあるが，淡水側では水位上昇，塩水側では水位低下が生じ，それが水路両端へ伝播していく。やがて水路端で反射がおこり，それが両端に達すると水位は若干回復するが，さらにその反射が生じて塩水側水位は再び低下，淡水側水位は再び上昇する。このような変化をくり返しつつ変動幅は徐々に減少していく。その一例を図40に示す。これを，水路両端壁面における水位変化としてみたのが図41～43である。

5.6.2　考　察

Barr[20] はこのような水位変化が生じ得ることを定性的に示したが，彼は表面波の伝播・反射による模式的な変化を示しているにすぎない。詳細に把握したのは本研

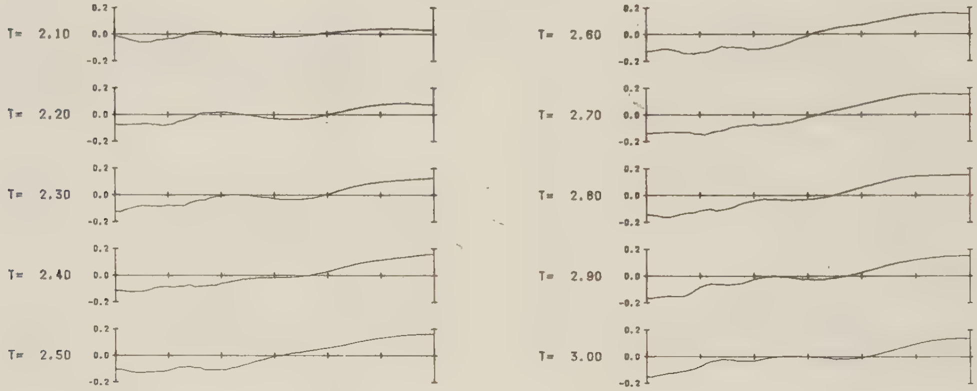


Fig.5-22 (continued)

図 40　（つづき）
(continued)

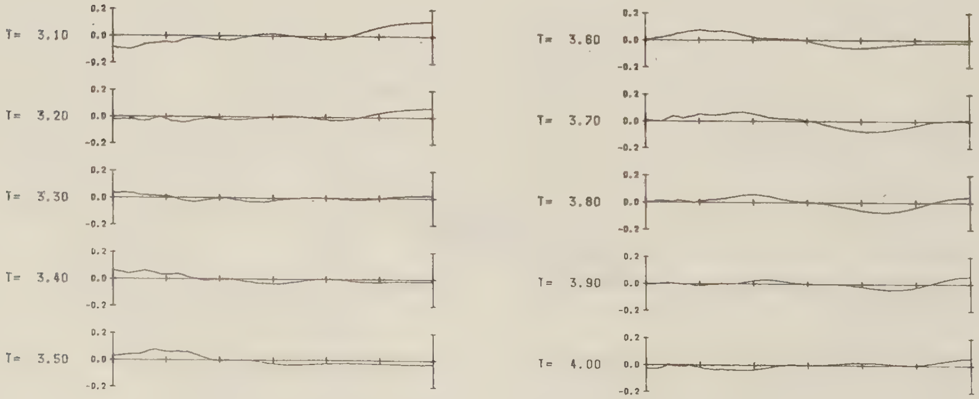


Fig.5-22 (continued)

図 40　（つづき）
(continued)

究が初めてである。

図40～43より，水位変化の時間変動周期については，表面波の伝播・反射あるいは水路の固有振動周期が重要な支配因子と考えられるが，それだけでは説明できず，密度差に伴う流れによって生ずる水面の上昇・低下をも含めて検討する必要があろう。なお，変化量が微小（$H_0=10\,\mathrm{cm}$，$\varepsilon=0.03$の場合で最大±２ｍｍ程度）なため，水理実験においてはそれを把握するための測定が未だなされていない。

重力場において水面勾配が流れの支配因子としてきわめて重要であることは周知の事実であり，先端部の移動速度は水位の時間的・空間的変化に伴う微小な水面勾配変化の影響を強く受けているものと考えられる。また，ゲート位置での流量フラックスも水面勾配変化の影響を受けるであろうから，その流量フラックスの変化（図44参照）が先端部の移動速度に影響している可能性も考えられる。

ところで，これらの現象は本研究の過程で初めて詳細に把握されたものであり，水位変化と先端部の移動速度との定量的関係については必ずしも明確な解答を得るには至っていない。しかし，定性的には強い相関（たとえば，図30～32と図41～43とを比較してみよ）が認められるので，今後さらに詳細に検討する必要があろう。

5.7　その他の結果と考察

5.7.1　ゲート位置でのフルード数

ゲート位置でのフルード数の時間変化を数値解析結果から整理してみた一例を図44に示す。この変化は，水面勾配の変化にほぼ対応しているように思われる（図41～43参照）。なお，平均的には上層，下層ともほぼ0.5である。また，ゲート位置での界面水深 h_G は実験結果，数値解析結果とも約0.5 H_0 で，かつ時間的にもほぼ一定であった。

なお，ゲート位置でのフルード数は水理実験では未だ明らかでない。

5.7.2　準定常部における内部界面マサツ抵抗係数

先端部後方の準定常的な部分（界面水深が空間的・時間的にほぼ一定とみなせる部分）においては，二層流としての内部界面マサツ抵抗係数を数値解析結果の速度分布から近似的に試算することができる。本研究で用いた解析手法を検証する一つとして，ここで，その値を試算し，既存の値と比較してみよう。内部界面マサツ抵抗係数 f_i は次式で定義される。

$$f_i=\frac{2\tau}{\rho u^2}\fallingdotseq\frac{2\mu}{\rho u^2}\left(\frac{\Delta u}{\Delta y}\right);\ u=|u_2-u_1| \tag{77}$$

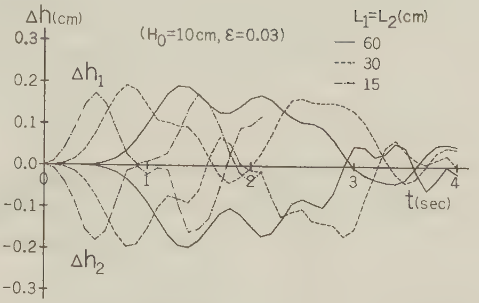


図 41　水路両端壁面水位変化（計算例１）
Time variation of water levels at each end of the channel

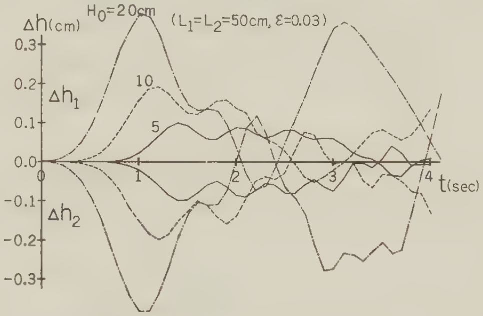


図 42　水路両端壁面水位変化（計算例２）
Time variation of water levels at each end of the channel

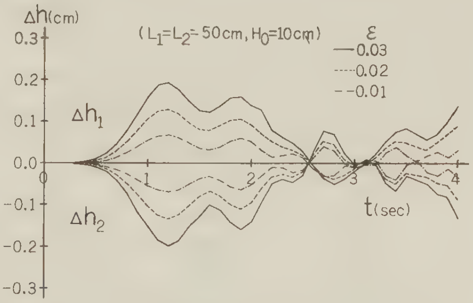


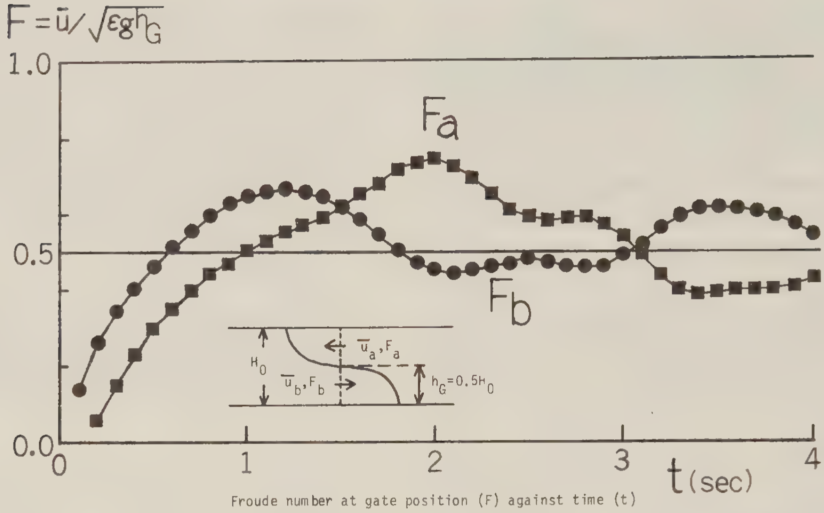
図 43　水路両端壁面水位変化（計算例３）
Time variation of water levels at each end of the channel

ここに，u_1，u_2：上層流，下層流の断面平均流速，μ：分子粘性係数，$\Delta u/\Delta y$：界面での速度勾配の近似値である。

図45は，試算した f_i の値を玉井・浅枝54)の図にのせてみたものである。玉井・浅枝は

$$f_i\fallingdotseq k(ReFd^5)^{-\frac{1}{2}} \tag{78}$$

の形の理論式を誘導し，既存の実験値・観測値にあては



Froude number at gate position (F) against time (t)
(numerical simulation,DC03)

図 44 ゲート位置のフルード数
Froude number at gate position（F）against time（t）
（numerical simulation, DC 03）

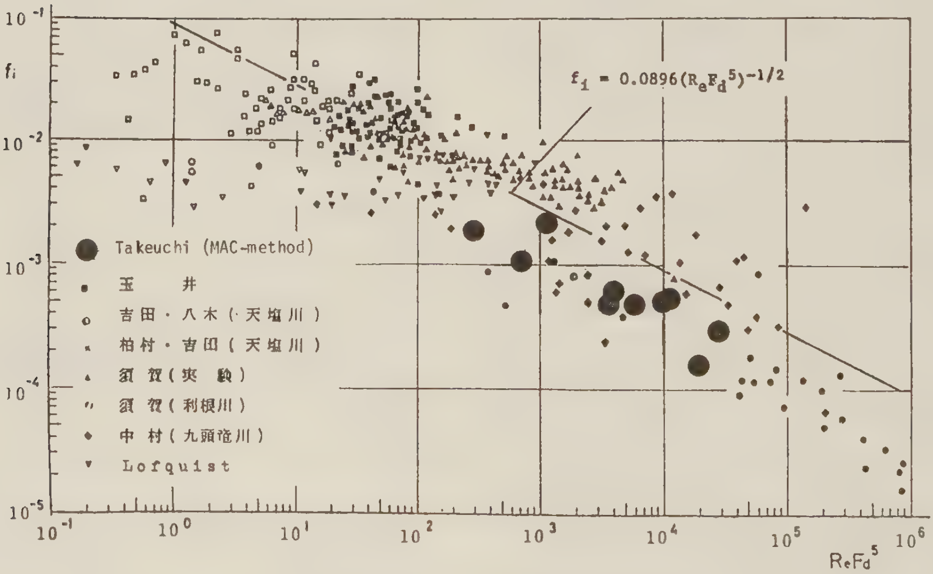


図 45 準定常部における内部界面抵抗係数
Coefficient of interfacial friction f_i against ReFd^5 in the part of quasi-steady flow〔original chart by Tamai・Asaeda（1978）〕

めて

$k=0.0896$ （79）

を得た。ただし，図中の黒丸印の利根川の資料については

$k=0.0312$ （80）

利根川・天塩川の資料については

$k=0.0303$ （81）

を得ている。

著者の計算値は玉井・浅枝の理論式（78）にのっており，$k \fallingdotseq 0.048$である。観測値や実験値の範囲内におさま

表 3　計算所要時間

The time required for calculation

```
        TABLE 5-1     THE TIME REQUIRED FOR CALCULATION

 RUN      CPU-TIME (SEC/CYCLE)            MESHES    PARTICLES
                                                     (A)    (B)
DC800   7.14 (AVERAGE OF  400 CYCLES)   1428     8000   8000
DC801   4.39 (AVERAGE OF  300 CYCLES)    868     4800   4800
DC802   4.89 (AVERAGE OF  300 CYCLES)    868     4800   4800
DC803   3.23 (AVERAGE OF 1000 CYCLES)    868     4800   4800
DC804   5.26 (AVERAGE OF  600 CYCLES)    868     7680   1920
DC805   3.07 (AVERAGE OF 1100 CYCLES)    868     6400   3200
DC806  25.39 (AVERAGE OF  400 CYCLES)   3528    24000  16000
```

注）計算所要時間は，新流速・新圧力を求める際の計算反復回数等により各サイクル毎に異なる。なお，ここに格げた値は農水省研究計算センター Acos 800 システム使用時の例である。また，DC 806 は仮想記憶を使用している。

っており，ほぼ妥当な値と考えられる。

5.8　数値解析手法の検証

以上，先端部の流動に関する諸特性について，水理実験結果と数値解析結果の報告と考察を述べてきた。その中で，実験値と計算値との相互比較を可能な限り行った。その結果，数値解析結果は水理実験結果に定量的にきわめて良好に一致することが確認された。

したがって，本研究にて改良・拡張した数値解析手法の有効性はほぼ検証されたと考えることができる。このことにより，本手法の沿岸海洋域への適用の基礎がつくられたと考えてよいであろう。

5.9　計算所要時間

本研究中の計算例のいくつかについて，その計算所要時間を表3に示す。この値は，農林水産省研究計算センター ACOS-800 システム使用時の値である。国立大学における全国共同利用大型計算機センターのシステムでは，この値の $^1/_{10}$ 以下になるものと思われる。また，最近のスーパーコンピュータを用いれば，少なくとも $^1/_{100}$ 以下に短縮されるものと考えられる。演算速度や記憶容量等の制約は，電子計算機の目ざましい発展によって取り除かれつつある。

このような状況の中で，流体の数値解析の分野では，差分法，有限要素法等の手法を問わず，格子スケール内あるいは要素スケール内での現象をいかにして計算に反映させるかについての理論的・実験的基礎を十分に確立することが必要となってきているのが実情であろう。

6.　結　　論

以上によって，底層密度流先端部の水理特性が一定の範囲内においてではあるが，きわめて明瞭になった。本研究の主要成果は以下の通りである。

1.　先端部の水理特性の明確化

⑴　形状特性

先端部の二次元的平均界面形状は，その最大厚さ d で無次元化するとほぼ相似形となることが確認された。また，Middleton や Keulegan はほぼ良い結果を得ていた。

⑵　移動特性

①　移動速度は若干周期的ながらも非定常な時間変化を示すことが初めて詳細に明らかにされた。この変動周期は貯留長 L や貯留水深 H_0 によって異なるが，相対密度差 ε にはほとんどよらないようである。このことは，表面波の伝播・反射の影響が支配的であることを示唆するが，それだけでは説明できず，密度差に伴う流れをも含めて検討する必要がある。

②　平均移動速度に関する従来の実験値の大きな分散の主因は，この非定常な時間変化特性を十分考慮していないことにあると考えられ，従来の個々の実験値の信頼性は低いと考えざるを得ない。ただし，数多くの実験例の全平均としての値には，その実験範囲内においてある程度の信頼性があろう。

③　本研究においては，以上の点を十分考慮して平均移動速度を算出したこと，また，実験・解析条件を系統的に変化させたことにより，無次元平均移動速度 $\bar{K}$ は内部レイノルズ数 Re が大きくなるほど増大する傾向を初めて明確に示すことができた。また，$\bar{K}_d$ は先端部の相対厚さ d' と逆相関の関係にあることがわかった。なお，本研究範囲内での $\bar{K}$ の全平均値は約0.45であった。

⑶　流況特性

①　先端部は内部に渦を巻きつつ進行し，進行方向の最大速度は最先端から約 0.2d 内側の位置で生じている。

②　先端付近には鉛直速度成分が無視し得ぬ値（水平速度成分比30～70％）で存在し，数値解析におけるマーカー粒子は先端界面に沿って巻き上げられる。同様の現象は実験においても観察され，実際現象としての先端部通過に伴う底質巻上げ等を示唆している。

2.　数値解析手法の確立

解析結果と実験結果とを可能な限り相互比較したところ，両者は極めて良好に一致することが確認された。すなわち，本研究にて改良・拡張した数値解析手

法の有効性が検証された。このことにより本手法の沿岸海洋域への適用の基礎がつくられたと考えられる。

このように，底層密度流先端部の水理特性を水理実験と数値解析との両面から定量的に把握する試みはほぼ遂行された。本研究は先端部をもつ密度流の定量的研究に一定の成果をあげたと思われる。

なお，密度流先端部の挙動の解析は，水産を対象とする環境解明に重要な意味を持っている。

密度流先端部は，河川への塩水楔の遡上，河口から海域へ向けての淡水・汽水の拡散フロント，大陸棚への冷水塊の内部潮汐遡上フロントなどにあらわれ，浮遊懸濁物質の輸送・沈澱，水産生物の卵稚仔や浮遊幼生の輸送・集積，成魚の魚道形成等に関与している。したがって，先端部の特性を十分熟知することによって，幼稚仔の再生産助長のための増殖場造成，漁業生産場としての人工魚礁漁場の造成などに役立てることができる。

また，沿岸海洋密度流シミュレーション手法の開発は，海洋観測が時空間的に広域連続実施ができない現状では極めて有効である。本研究では，水理実験との対比の範囲内で数値解析プログラムを作成したが，実海域への適用を考えると，コリオリ力や遠心力等の項の追加が必要であり，また三次元に拡張することも必要であろう。

なお，本研究においては，先端部の三次元的特性や界面での混合特性には触れていない。また，研究過程で提出された微小な水面変動と移動速度との関係についての詳細な検討は今後の研究課題として残された。

これらのものの究明は今後の研究に待たねばならないが，本研究はその研究に一つの重要な基礎を与えるであろう。

あとがき

本研究の遂行にあたって，東京大学農学部志村博康教授から終始適切な御指導・御助言をいただいた。また，本論文をまとめるに際しては，東京大学海洋研究所平野敏行教授ならびに農林水産省水産工学研究所中村充部長* から貴重な御助言をいただいた。

著者が東京大学大学院在学中より東京大学名誉教授緒形博之博士，東京大学農学部中村良太助教授，同久保成隆助手，同後藤章助手，農林水産省農業土木試験場木ノ瀬紘一博士，同島田正志博士らに研究討論に加わっていただき貴重な示唆を受けた。また，名古屋大学プラズマ研究所武本行正助手，京都大学農学部鳥井清司助手には文献入手に便宜をはかっていただいた。

本論文中の実験は著者の愛媛大学農学部在任中に行われ，同学部野崎英信技官ならびに当時の専攻生諸君の協力を得た。また，同学部関谷光博教授，同福島忠雄助教授には実験室使用上の便宜をはかっていただいた。

なお，農林水産省水産工学研究所中村充部長には本論文をまとめるに際して作業上の御配慮をいただいた。

本論文は先人達の研究業績をふまえ，以上の多くの方々の協力を得て完成された。ここに深く感謝する次第である。

なお，本論文中の計算には，東京大学大型計算機センター HITAC 8800/8700システム，九州大学大型計算機センター FACOM-M-190 システムとそのリモートバッチ端末としての愛媛大学計算機室 FACOM 230-28システムおよび農林水産省研究計算センター ACOS-800 システムを利用した。また，データ整理の一部は水産工学研究所水産土木工学部のデータ処理装置OKITAC 50/40システムを用いて行った。なお，東京大学大型計算機センターにおける計算の一部は，同センター付プログラム指導員（昭和49年7月～昭和53年7月）としての課題番号によるものである。

以上，ここに付記する。

記　号　表

（A，B，C：α，β，γ 順）

$\left.\begin{array}{r}A_1\sim A_4：\\ B_1\sim B_4：\end{array}\right\}$ マーカー粒子移動速度の算出に用いる重み

C：(65)式中の無次元定数

D：速度ダイヴァージェンス（$\equiv \mathrm{div}\,\boldsymbol{V}$）

D/Dt：微分演算子$\left(\equiv \dfrac{\partial}{\partial t}+u\dfrac{\partial}{\partial x}+v\dfrac{\partial}{\partial y}\right)$

DT：時間差分間隔

DX：x 方向差分間隔

DY：y 方向差分間隔

d：先端部最大厚さ，または表面と FUL セル中心との距離

d'：d の無次元量（$=d/H_0$）

F：フルード数

$F_d{}'$：フルード数

f_i：界面マサツ抵抗係数

g：重力加速度

g_x：外力の x 方向成分

g_y：外力の y 方向成分

H_0：初期貯留水深

h：水位

h_1：淡水側水路端水位

---

* 現在は企画連絡室長

h_2：塩水側水路端水位
h_G：ゲート位置での界面水深
i：x方向差分の添字
j：y方向差分の添字
$K_{i,j}$：格子網スケール渦動粘性係数
K：先端部の無次元移動速度（$=u_f/\sqrt{\varepsilon g H_0}$）
K：Kの時間平均値または集団平均値
K_d：先端部の無次元移動速度（$=u_f/\sqrt{\varepsilon g d}$）
$\bar{K}_d$：K_d の時間平均値または集団平均値
k：(78)式における定数，波数
L_1：淡水貯留長
L_2：塩水貯留長
l：反復計算回数を示す上つき添字
$\left.\begin{array}{r} m_x : \\ m_y : \end{array}\right\}$ 接線方向単位ベクトルの各成分
n：時間ステップを示す上つき添字
$\left.\begin{array}{r} n_x : \\ n_y : \end{array}\right\}$ 法線方向単位ベクトルの各成分
n_1, n_2：一つのセル内のマーカー粒子の個数
n_k：法線方向単位ベクトル
p：圧力
p^0：仮圧力
p_{ni}：法線圧力
p_s：表面圧力
P_{SUR}：SUR セルにおける圧力
P_{FUL}：FUL セルにおける圧力
Re：内部レイノルズ数（$=H_0\sqrt{\varepsilon g H_0}/\nu$）
Re_d：先端部のレイノルズ数（$=d\cdot\sqrt{\varepsilon g d}/\nu$）
T_1：淡水の水温
T_2：塩水の水温
t：時間
t'：tの無次元量$\left(=\dfrac{\sqrt{\varepsilon g H_0}}{H_0}t\right)$
t_G：ゲート開放所要時間
t_G'：t_G の無次元量
$U_1 \sim U_4$：マーカー粒子移動速度算出に用いるx方向速度成分
u：x方向速度成分
u'：uの無次元量（$=u/\sqrt{\varepsilon g H_0}$）
u_f：先端部移動速度のx方向成分
u_f'：u_f の無次元量（$=u_f/\sqrt{\varepsilon g H_0}$），$K$に同じ
$\bar{u}_f$：u_f の時間平均値
$u_{\max}$：先端部内での最大速度または全メッシュでの最大流速
$V_1 \sim V_4$：マーカー粒子移動速度算出に用いるy方向速度成分
$\boldsymbol{V}$：速度ベクトル
v：y方向速度成分
v_f：先端部におけるv
X：水平座標（先端底面を原点とする）
Y：鉛直座標（先端底面を原点とする）
$X_k(x_k, y_k)$：マーカー粒子の位置
x：水平座標
y：鉛直座標
x_f：先端の位置
x_f'：x_f の無次元量（$=x_f/H_0$）
α：計算メッシュのアスペクト比，(62)式の普遍定数
β：緩和係数$\left(=\dfrac{\beta_0}{2\delta t}\Big/\left(\dfrac{1}{\delta x^2}+\dfrac{1}{\delta y^2}\right)\right)$
β_0：加速緩和係数（流速・圧力同時緩和計算に用いる）
Δ：格子間隔（$=(\delta x\cdot\delta y)^{\frac{1}{2}}$）
Δh：水位偏差
Δh_1：淡水側水路端の水位偏差
Δh_2：塩水側水路端の水位偏差
δ_{ik}：クロネッカーのデルタ
δt：時間差分間隔（DT に同じ）
δx：x方向差分間隔（DX に同じ）
δy：y方向差分間隔（DY に同じ）
ε：相対密度差（$=(\rho_2-\rho_1)/\rho_2$），エネルギー逸散率
$\zeta_{i,j+\frac{1}{2}}$：x方向運動方程式にて時間ステップnでの既知項
η：表面セル圧力補間に用いる係数（$=\delta y/d$）
θ：水面勾配
μ：分子粘性係数
ν：動粘性係数
$\xi_{i+\frac{1}{2},j}$：y方向運動方程式にて時間ステップnでの既知項
ρ：密度
ρ_1：淡水密度
ρ_2：塩水密度
σ_{ik}：ストレステンソル
σ'_{ik}：粘性ストレステンソル
$\left.\begin{array}{r} \sigma'_{xx} : \\ \sigma'_{yx} : \\ \sigma'_{yy} : \\ \sigma'_{xy} : \end{array}\right\}$ 粘性ストレステンソル σ'_{ik} の各成分

τ：マサツ応力
Ψ：流れ関数
ω：渦度

参考文献

1） 水産庁研究部（1981）：水産増養殖に関する研究レビュウ，197―205.
2） 中村充（1979）：水産土木学，工業時事通信社，508 pp.
3） Schmidt, W.(1910)：Gewitter und Böen, rasch Druckanstiege, Sitzber, Akad. Wiss., Wien, Abt. 2a, 119, 1104―1214.
4） Hoult, D.P.（1972）：Oil spreading on the sea, Ann. Rev. Fluid Mech., 4, 341―368.
5） Masuda, A. and Y. Nagata（1974）：Water wedge advancing along the interface between two homogeneous layers, J. Oceanogr. Soc. of Japan, 30, 289―297.
6） Turner, J. S.（1973）：Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge Univ. Press, 367 pp.
7） Keulegan, G. H.（1966）：The mechanism of arrested saline wedge, In Estuary and Coastline Hydrodynamics ed. by Ippen, McGraw-Hill, N.Y.
8） 王井信行（1980）：密度流の水理，技報堂，145.
9） 福岡捷二・福嶋祐介・村田和夫・荒井健（1980）：成層化した二次元貯水池に流入する密度の実験的研究，土木学会論文報告集，293，65―77.
10） Ippen, A. T. and D. R. F. Harleman（1952）：Steady state characteristics of subsurface flow. Proc. NBS Symp. on Gravity Waves, U.S. Nat. Bur. Stand., Circ. 521, 79―93.
11） Middleton, G.V.（1966）：Experiments on density and turbidity currents, I. Motion of the head, Canada. J. Earth Sci., 3, 523―546.
12） Keulegan, G.H.（1957）：An experimental study of the motion of saline water from locks into fresh, U.S. Nat. Bur. Stand. Rep. no. 5168（unpublished）.
13） Keulegan, G.H.（1958）：The motion of saline fronts in still water, U.S. Nat. Bur. Stand. Rep. no 5831（unpublished）
14） Simpson, J. E.（1969）：A comparison between laboratory and atmospheric density currents, Quart. J.R. Met. Soc., 95, 758―765.
15） Simpson, J. E.（1972）：Effects of the lower boundary on the head of a gravity current, J. Fluid Mech., 53, 759―768.
16） von Kármán, T.（1940）：The engineer grapples with non-linear problems, Bull. Am. Math. Soc., 46, 615―683.
17） O'Brien, M. P. and J. Cherno.（1932）：Model law for motion of salt water through fresh, Proc. ASCE, 58, 1769―1788.
18） Yih, C.S.（1965）：Dynamics of Nonhomogeneous Fluids, Macmillan, N.Y., 134―138.
19） 室田明・神田徹（1964）：水門からの海水侵入に関する基礎的研究，第11回海岸工学講演会講演集，131―136.
20） Barr, D. I. H.（1967）：Densimetric exchange flow in rectangular channels, Ⅲ. Large scale experiment, La Houille Blanche, No. 6―1967. 619―632.
21） 土木学会水理委員会密度流研究小委員会（1975）：成層密度流の界面現象(2)，土木学会論文報告集，243，99―109.
22） 武内智行(1980)：密度流先端部の流動機構について(2)，農業土木学会中国四国支部講演要旨，22―24.
23） 武内智行（1981）：密度流先端部の流動特性について，農業土木学会大会講演要旨集，105―106.
24） 武内智行（1979）：密度流先端部の流動機構について，農業土木学会中国四国支部講演要旨，24―26
25） 武内智行（未発表）
26） Keulegan, G. H.（1950）：Internal gravity or "density" currents, In Engineering Hydraulics ed. by H. Rouse, 763―766, Wiley, N. Y.
27） Barr, D. I. H.（1963）：Densimetric exchange flow in rectangular channels, I. Definitions, review and relevance to model design, Ⅱ. Some observations of the structure of lock exchange flow, La Houille Blanche, No. 7―1963, 739―766.
28） Daly, B.J. and W.E. Pracht（1968）：Numerical study of density-current surges, Phys. Fluids, 11(1), 15―30.
29） 武内智行（1976）：自由表面をもつ急変不定流の数値解析に関する研究，東京大学修士論文.
30） 武内智行（1980）：自由表面をもつ Densimetric Exchange Flow のシミュレーション―MAC 法による不定流解析（Ⅱ）―，農業土木学会論文集，88，27―32.

31） 武内智行（1982）：MAC 法による非定常密度流のシミュレーション，水産庁水産工学研究所報告，3，41—66.

32） 福岡捷二・水村和正・加納敏行（1978）：密度流先端部の流動機構に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，274，41—55.

33） Welch, J. E., F. H. Harlow, J. P. Shannon and B.J. Daly.(1966)：The MAC Method, Los Alamos Scientific Laboratory, LA—3425.

34） 武本行正・武内智行・奥村博司・薦田広章(1982)：自由表面および内部境界面をもつ開水路非定常流の数値解析法，農業土木学会誌，50，487—503.

35） 武本行正ら（1980）：非圧縮性粘性流体の数値解法プログラム（その１），京都大学大型計算機センター広報，13，453—461.

36） 鳥井清司（1979）：MAC 法による自由表面をもつ流れの数値解析，日本機械学会関西支部第36回特別講義会テキスト，57—80.

37） Chan, R.K.C. and R.L. Street（1970）：A computer study of finite amplitude waves, J. Comp. Phys., 6，68—94.

38） Slotta, L.S. et al（1969）：Stratified Reservoir Currents, Oregon State Univ., Bulletin No. 44.

39） Amsden, A.A. and F.H. Harlow（1970）：The SMAC Method, Los Alamos Scientific Laboratory, LA—4370.

40） 武内智行（1976）：前出 29）または，農業土木学会論文集，87，45—53（1980）.

41） Garcia Jr., W. J. and J. A. Viecelli.（1976）：ABMAC-Arbitrary Boundary Marker and Cell Eulerian Hydrodynamic Incompressible Numerical Method, Lawrence Livermore Laboratory.

42） Viecelli, J.A.（1971）：A computing method for incompressible flows bounded by moving walls, J. Comp. Phys., 8，119—143.

43） Hirt, C. W., B. D. Nichols and N. C. Romero.（1975）：SOLA：A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flow, Los Alamos Scientific Laboratory, LA—5852.

44） 今井功（1973）：流体力学（前編），裳華房，20—22

45） 椿東一郎（1973）：水理学Ｉ，森北出版，41—42.

46） ランダウ・リフシッツ（1970）：流体力学１，竹内均訳，東京図書，55.

47） Young, J. A. and C. W. Hirt（1972）：Numerical calculation of internal wave motions, J. Fluid Mech., 56，265—276.

48） Hirt, C.W. and J.L. Cook（1972）：Calculating three dimensional flows around structures and over rough terrain, J. Comp. Phys., 10，324—340.

49） 土木学会編（1974）：土木工学における数値解析/流体解析編，サイエンス社，27—28.

50） Deardorff, J. W.（1970）：A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J. Fluid Mech., 41(2)，453—480.

51） Deardorff, J.W.（1971）：On the magnitude of the subgrid scale eddy coefficient, J. Comp. Phys., 7，120—133.

52） Hirt, C. W.（1968）：Heulistic stability theory for finite-difference equations, J. Comp. Phys., 2，339—355.

53） 平野宗夫・羽田野袈裟義（1981）：密度流先端部の流動特性について，土木学会論文報告集，314，67—73.

54） 玉井信行・浅枝隆（1978）：淡塩２層流境界面における抵抗係数について，土木学会論文報告集，271，67—81.

55） Allen, J.R.L.（1971）：Mixing at turbidity current heads, and its geological implications, J. Sedimentary Petrology, 41，97—113.

資料 1 実験条件一覧

Conditions of experiment

Run No.	H_0	L_1	L_2	ρ_1	ρ_2	ε	T_1	T_2	t_G
101-1	5	50	50	1.0004	1.0092	0.0087	10.2	10.3	3/18
101-2	5	50	50	1.0004	1.0090	0.0085	11.5	10.6	4/18
101-3	5	50	50	1.0002	1.0100	0.0097	9.4	8.3	7/18
102-1	10	50	50	1.0004	1.0092	0.0087	11.2	10.5	2/18
102-2	10	50	50	1.0004	1.0090	0.0085	11.4	10.6	5/18
102-3	10	50	50	1.0002	1.0100	0.0097	11.2	8.3	12/18
103-1	20	50	50	1.0004	1.0090	0.0085	11.2	10.5	23/18
103-2	20	50	50	1.0002	1.0100	0.0097	12.0	8.3	12/18
103-3	20	50	50	1.0002	1.0100	0.0097	10.8	8.5	22/18
104-1	5	150	50	1.0004	1.0090	0.0085	11.3	10.5	3/18
104-2	5	150	50	1.0002	1.0100	0.0097	10.3	8.6	2/18
104-3	5	150	50	1.0011	1.0100	0.0088	9.6	10.1	4/18
105-1	10	150	50	1.0004	1.0090	0.0085	11.0	10.6	4/18
105-2	10	150	50	1.0002	1.0100	0.0097	10.7	8.6	19/18
105-3	10	150	50	1.0011	1.0100	0.0088	9.6	10.1	-
106-1	20	150	50	1.0002	1.0100	0.0097	10.9	8.5	18/18
106-2	20	150	50	1.0011	1.0100	0.0088	9.6	10.1	-
106-3	20	150	50	1.0011	1.0100	0.0088	9.6	10.4	9/18
107-1	5	100	100	1.0003	1.0100	0.0096	10.3	8.6	11/18
107-2	5	100	100	1.0012	1.0107	0.0094	9.7	9.3	4/18
107-3	5	100	100	1.0011	1.0104	0.0092	8.6	7.9	3/18
108-1	10	100	100	1.0003	1.0100	0.0096	10.4	8.6	5/18
108-2	10	100	100	1.0012	1.0107	0.0094	9.7	9.3	6/18
108-3	10	100	100	1.0011	1.0104	0.0092	9.7	8.0	8/18
109-1	20	100	100	1.0003	1.0100	0.0096	10.4	8.7	20/18
109-2	20	100	100	1.0012	1.0107	0.0094	9.7	9.3	8/18
109-3	20	100	100	1.0011	1.0100	0.0088	9.7	9.7	-
110-1	5	150	143	1.0003	1.0102	0.0098	9.3	9.5	3/18
110-2	5	150	143	1.0011	1.0107	0.0095	9.6	10.0	4/18
111-1	10	150	143	1.0005	1.0105	0.0096	9.8	9.5	4/18
111-2	10	150	143	1.0011	1.0107	0.0095	9.6	10.0	6/18
112-1	20	150	143	1.0004	1.0102	0.0097	9.8	9.5	18/18
112-2	20	150	143	1.0011	1.0107	0.0095	9.6	10.0	18/18

H_0: Initial depth of storage (cm)

L_1, L_2: Horizontal length of storage of fresh water and salt water (cm)

ρ_1, ρ_2: Density of fresh water and salt water (g/cm³)

$\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$: Relative density

T_1, T_2: Temperature of fresh water and salt water (°C)

t_G: The time required for gate opening (sec)

資料1（つづき）

Conditions of experiment

Run No.	H_0	L_1	L_2	ρ_1	ρ_2	ε	T_1	T_2	t_G
201-1	5	50	50	1.0010	1.0202	0.0188	9.4	9.1	-
201-2	5	50	50	1.0010	1.0200	0.0186	10.5	10.3	-
201-3	5	50	50	1.0013	1.0202	0.0185	9.8	8.0	-
202-1	10	50	50	1.0010	1.0202	0.0188	9.4	9.1	-
202-2	10	50	50	1.0010	1.0202	0.0188	10.0	10.7	-
202-3	10	50	50	1.0012	1.0202	0.0186	10.0	8.0	-
203-1	20	50	50	1.0010	1.0202	0.0188	9.9	9.1	-
203-2	20	50	50	1.0010	1.0202	0.0188	10.4	10.5	-
203-3	20	50	50	1.0012	1.0202	0.0186	10.5	8.0	-
204-1	5	150	50	1.0012	1.0202	0.0186	9.9	9.3	-
204-2	5	150	50	1.0013	1.0202	0.0185	10.0	8.0	-
204-3	5	150	50	1.0010	1.0202	0.0188	8.7	8.0	-
205-1	10	150	50	1.0010	1.0204	0.0190	9.6	10.0	-
205-2	10	150	50	1.0012	1.0202	0.0186	8.7	8.0	-
205-3	10	150	50	1.0010	1.0195	0.0181	10.0	10.1	-
206-1	20	150	50	1.0010	1.0204	0.0190	10.0	10.3	12/18
206-2	20	150	50	1.0012	1.0202	0.0186	11.0	8.0	6/18
206-3	20	150	50	1.0010	1.0195	0.0181	10.0	10.1	10/18
207-1	5	100	100	1.0012	1.0196	0.0180	9.1	9.0	4/18
207-2	5	100	100	1.0011	1.0195	0.0180	9.7	10.8	5/18
207-3	5	100	100	1.0012	1.0195	0.0179	9.7	11.1	3/18
208-1	10	100	100	1.0012	1.0196	0.0180	9.1	9.0	7/18
208-2	10	100	100	1.0011	1.0195	0.0180	9.7	10.8	6/18
208-3	10	100	100	1.0015	1.0195	0.0177	10.3	11.2	5/18
209-1	20	100	100	1.0012	1.0196	0.0184	9.1	9.0	17/18
209-2	20	100	100	1.0011	1.0195	0.0180	9.7	10.9	14/18
209-3	20	100	100	1.0015	1.0200	0.0181	10.3	10.5	9/18
210-1	5	150	143	1.0010	1.0199	0.0185	8.6	9.0	3/18
210-2	5	150	143	1.0010	1.0210	0.0196	10.0	10.1	3/18
211-1	10	150	143	1.0010	1.0199	0.0185	10.6	9.0	5/18
211-2	10	150	143	1.0009	1.0215	0.0202	9.5	10.0	6/18
212-1	20	150	143	1.0015	1.0200	0.0181	10.3	10.5	14/18
212-2	20	150	143	1.0010	1.0199	0.0185	10.5	9.0	-
212-3	20	150	143	1.0009	1.0215	0.0202	9.5	10.0	8/18

H_0: Initial depth of storage (cm)

L_1,L_2: Horizontal length of storage of fresh water and salt water (cm)

ρ_1,ρ_2: Density of fresh water and salt water (g/cm^3)

$\varepsilon=(\rho_2-\rho_1)/\rho_2$: Relative density

T_1,T_2: Temperature of fresh water and salt water (°C)

t_G: The time required for gate opening (sec)

資料1（つづき）

Conditions of experiment

Run No.	H_0	L_1	L_2	ρ_1	ρ_2	ε	T_1	T_2	t_G
301-1	5	50	50	1.0001	1.0300	0.0290	10.5	4.7	4/18
301-2	5	50	50	1.0003	1.0300	0.0288	10.2	5.1	5/18
301-3	5	50	50	1.0005	1.0299	0.0285	9.6	6.9	4/18
302-1	10	50	50	1.0001	1.0300	0.0290	9.8	4.8	14/18
302-2	10	50	50	1.0003	1.0300	0.0288	9.8	5.2	7/18
302-3	10	50	50	1.0004	1.0298	0.0285	10.0	7.7	-
303-1	20	50	50	1.0002	1.0300	0.0289	10.0	4.8	16/18
303-2	20	50	50	1.0003	1.0300	0.0288	9.3	5.4	13/18
303-3	20	50	50	1.0004	1.0298	0.0285	10.0	7.7	8/18
304-1	5	150	50	1.0001	1.0300	0.0290	10.1	9.0	7/18
304-2	5	150	50	0.9998	1.0301	0.0294	9.9	7.7	3/18
305-1	10	150	50	1.0000	1.0300	0.0291	10.0	9.0	14/18
305-2	10	150	50	1.0000	1.0301	0.0292	10.2	7.8	4/18
305-3	10	150	50	1.0004	1.0298	0.0285	10.0	8.2	9/18
306-1	20	150	50	1.0000	1.0300	0.0291	10.0	9.0	13/18
306-2	20	150	50	1.0009	1.0301	0.0283	9.8	7.9	12/18
306-3	20	150	50	1.0004	1.0298	0.0285	10.0	8.2	9/18
307-1	5	100	100	1.0008	1.0299	0.0283	10.5	5.8	5/18
307-2	5	100	100	1.0009	1.0299	0.0282	10.3	6.6	5/18
307-3	5	100	100	1.0009	1.0299	0.0282	10.3	7.0	5/18
308-1	10	100	100	1.0008	1.0299	0.0283	10.6	5.9	7/18
308-2	10	100	100	1.0009	1.0299	0.0282	10.6	6.8	8/18
308-3	10	100	100	1.0003	1.0302	0.0290	9.8	6.9	7/18
309-1	20	100	100	1.0009	1.0299	0.0282	10.8	6.0	10/18
309-2	20	100	100	1.0003	1.0302	0.0290	9.8	6.9	7/18
309-3	20	100	100	1.0003	1.0302	0.0290	9.5	7.1	9/18
310-1	5	150	143	1.0010	1.0301	0.0282	9.8	9.6	3/18
310-2	5	150	143	1.0011	1.0300	0.0281	10.2	10.1	3/18
310-3	5	150	143	1.0012	1.0308	0.0287	10.0	8.2	4/18
311-1	10	150	143	1.0009	1.0301	0.0283	9.7	9.6	3/18
311-2	10	150	143	1.0011	1.0300	0.0281	10.2	10.1	4/18
311-3	10	150	143	1.0012	1.0308	0.0287	10.0	8.2	3/18
312-1	20	150	143	1.0009	1.0301	0.0283	9.7	9.7	9/18
312-2	20	150	143	1.0011	1.0300	0.0281	11.0	10.0	8/18
312-3	20	150	143	1.0012	1.0308	0.0287	10.0	8.2	7/18

H_0: Initial depth of storage (cm)

L_1, L_2: Horizontal length of storage of fresh water and salt water (cm)

ρ_1, ρ_2: Density of fresh water and salt water (g/cm^3)

$\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$: Relative density

T_1, T_2: Temperature of fresh water and salt water (°C)

t_G: The time required for gate opening (sec)

資料 2　計算条件一覧

Conditions of numerical simulation

Run	H_0	L_1	L_2	ρ_1	ρ_2	ε	ν	DX	DY	DT
DC003	10.0	50	50	1.000	1.030	0.029	1.00	1.00	1.00	0.0100
DC013	10.0	30	30	1.000	1.030	0.029	1.00	1.00	1.00	0.0100
DC022	10.0	48	12	1.000	1.030	0.029	1.00	1.00	1.00	0.0100
DC023	10.0	30	30	1.000	1.030	0.029	0.01	1.00	1.00	0.0100
DC024	10.0	30	30	1.000	1.030	0.029	0.10	1.00	1.00	0.0100
DC425	5.0	15	15	1.000	1.030	0.029	1.00	0.50	0.50	0.0100
DC426	20.0	80	40	1.000	1.030	0.029	1.00	2.00	2.00	0.0050
DC510	10.0	30	30	1.000	1.010	0.010	1.00	1.00	1.00	0.0100
DC601	10.0	150	100	1.000	1.030	0.029	1.00	1.00	1.00	0.0100
DC800	10.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC801	10.0	30	30	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC802	5.0	15	15	1.000	1.030	0.029	*	0.50	0.50	0.0200
DC803	20.0	60	60	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC805	20.0	80	40	1.000	1.030	0.029	*	2.00	2.00	0.0050
DC820	15.0	45	45	1.000	1.030	0.029	*	1.50	1.50	0.0050
DC821	7.5	30	30	1.000	1.030	0.029	*	0.75	0.75	0.0100
DC822	2.5	10	10	1.000	1.030	0.029	*	0.25	0.25	0.0100
DC823	10.0	30	30	1.000	1.010	0.010	*	1.00	1.00	0.0200
DC824	10.0	30	30	1.000	1.005	0.005	*	1.00	1.00	0.0200
DC825	10.0	30	30	1.000	1.030	0.029	*	0.50	0.50	0.0050
DC827	20.0	60	60	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0025
DCG05**	10.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0050
DCG06**	10.0	100	100	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0050
DC901	10.0	60	60	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC902	10.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC903	10.0	40	40	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC904	10.0	30	30	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC905	10.0	20	20	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC906	10.0	15	15	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC907	5.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0100
DC908	20.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0050
DC909	30.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0050
DC910	10.0	50	50	1.000	1.020	0.020	*	1.00	1.00	0.0100
DC911	10.0	50	50	1.000	1.010	0.010	*	1.00	1.00	0.0200
DC912	10.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	1.00	1.00	0.0010
DC913	10.0	50	50	1.000	1.030	0.029	*	0.50	0.50	0.0010

H_0; Initial depth of storage (cm)

L_1,L_2; Horizontal length of storage of fresh water and salt water (cm)

ρ_1,ρ_2; Density of fresh water and salt water (g/cm^3)

$\varepsilon=(\rho_2-\rho_1)/\rho_2$; Relative density

ν; Coefficient of kinematic viscosity (cm^2/sec)

DX,DY; The cell size in the x-,y-direction (cm)

DT; The time step (sec)

* Smagorinsky-Deardorff model (Sub-grid scale eddy coefficient)

** Gate control

資料　3　プログラム・ソースリスト

Program listing of the modified MAC method

本研究にて改良・拡張した密度流用MAC法プログラムのソースリストを資料として以下に示す。

なお、本プログラムのモジュール構成と各モジュールの主な役割は次の通りである。

（1）モジュール構成

```
①MAIN（MAC110）――②PROG―┬―③BNDARY
                         ├―④MARKER
                         ├―⑤VISCO
                         ├―⑥DENST
                         ├―⑦LPLT2
                         └―⑧UF
```

（2）各モジュールの主な役割

①MAIN（MAC110）：対象とする空間スケール、差分スケール等の設定を行い、PROGに引渡す。

②PROG：主要な計算は本モジュール内で行う。

③BNDARY：境界流速等の設定を行う。

④MARKER：マーカー粒子の移動を行う。

⑤VISCO：Smagorinsky-Deardorff モデルによる格子網スケール渦動粘性係数を求める。

⑥DENST：質量保存式を用いて密度変化を求める。（テスト中、本論文中の計算には用いていない。）

⑦LPLT2：L／P上にマーカープロット図を作成する。

⑧UF：先端の位置、移動速度を求めるための特別なルーチン。

注）本プログラムによる図化処理はL／P上へのマーカープロット図のみである。XYプロッタを用いての図化処理は、本プログラムによる計算結果を補助記憶装置（磁気ディスク又は磁気テープ）上に保存しておき、別に用意したプログラムでそのデータを読取って行っている。

```
      PROGRAM MAC110
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C     TAKEUCHI/PROG110D-V03/1982.07./
C
C     MARKER-AND-CELL METHOD FOR TWO-DIMENSIONAL UNSTEADY DENSITY
C     FLOWS WITH FREE SURFACE AND/OR INTER-SURFACE
C     (TWO-DIMENSIONAL NAVIER-STOKES EQ.)
C
C     CELL TYPE : 'BND','FUL','SUR','EMP','OB','COR','GATE'
C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    * *
C    IMPROVED SURFACE CONDITION
C    SURFACE PRESSURE INTERPOLATION SCHEME IS APPLIED
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C----
C  DATA CARD
C   1. NAME
C         FORMAT(18A4)
C   2. IBAR,JBAR,DX,DY,DT,BO
C         FORMAT(2I5,4F10.0)
C   3. BCB,BCR,BCT,BCL,VNU,EPSD,GX,GY
C         FORMAT(4F3.0,F8.0,3F10.0)
C   4. TO,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW
C         FORMAT(5F10.0,I1,2X,I2)
C   5. ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
C     NXB,NYB,ULL,URR,RLL
C         FORMAT(I3,2I1,15I5/3F10.0)
C   6. IPN,NX,NY,XC,YC,XD,YD,U0,V0,R0
C         FORMAT(I1,I4,I5,7F10.0)
C----
C  CARD NO.1
C     NAME    : PROBLEM IDENTIFICATION NAME
C                        ( 72 CHARACTERS )
C  CARD NO.2
C     IBAR    : # OF INSIDE CELLS IN X-DIRECTION
C     JBAR    : # OF INSIDE CELLS IN Y-DIRECTION
C     DX      : THE CELL SIZE IN THE X-DIRECTION
C     DY      : THE CELL SIZE IN THE Y-DIRECTION
C     DT      : THE TIME STEP
C     BO      : THE RELAXATION PARAMETER IN THE 'PSI' ITERATION (1.9)
C  CARD NO.3
C     BCB,BCR,BCT,BCL :
C               BOUNDARY CONDITIONS FOR RIGID WALL (OR WALL SECTION)
C                 ON BOTTOM, RIGHT, TOP AND LEFT MESH BOUNDARIES.
C                   '1.0'    FREE-SLIP
C                   '-1.0'   NO-SLIP
C                   '0.0'    HALF-SLIP
C     VNU     : THE CONSTANT KINEMATIC VISCOSITY COEFFICIENT
C     VNU ｶﾞ ﾌ ﾉﾄｷ VISCOSITY ﾊ SMAGORINSKI-DEARDORFF ﾓﾃﾞﾙ ﾃﾞ ﾓﾄﾒﾙ
C     EPSD    : THE CONVERGENCE CRITERION FOR 'PSI' CALCULATION (0.001)
C     GX      : GRAVITY IN THE X-DIRECTION
C     GY      : GRAVITY IN THE Y-DIRECTION
C  CARD NO.4
C     TO      : THE STARTING TIME (0.0)
C     TWPRT   : INTERVALS OF PROBLEM TIME BETWEEN CELL PRINTS
C     TWT     : INTERVALS OF PROBLEM TIME BETWEEN TAPE DUMP
C     TWFIN   : PROBLEM FINISH TIME
C     XPR     : INTERVALS OF PROBLEM TIME BETWEEN KF/H/LPLOT PRINTS
C     IPR     : CONTROL CODE FOR 'XPR' (3)
C     IW      : TAPE DUMP FILE REFERENCE #
C  CARD NO.5
C     ITYPE   : OBSTACLE AND/OR INFLOW/OUTFLOW ﾉ ﾄｷ ｲｶﾞｲ ﾊ 0.
C     ITYPEL,ITYPER : TYPE CODE OF LEFT/RIGHT BOUNDARIES.
```

```
0063C     L1 - L13 : DIMENSIONS SHOWN IN FOLLOWING FIG.
0064C          (L9 - L13 IS NOT USED, BUT IN PREPARATION FOR FUTURE USE)
0065C
0066C
0067C                ***********************************
0068C                *                                  *
0069C                *                                  *-------
0070C        ------*                                           I
0071C         I                                 ---->(UR)   I
0072C         I       ---->(UL,RL)                             (L4)
0073C       (L2)                                             *--- I
0074C         I ---*            **************---        * I   I
0075C         I   I *            ************* I         * I   I
0076C         I(L1)*            *************(L7)       *(L3)I
0077C         I   I *            ************* I         * I   I
0078C        ------*************************************------
0079C                I---(L5)-->I                I
0080C                I                            I
0081C                I---------- (L6) ----->I
0082C
0083C
0084C     NXB,NYB : # OF PARTICLES/CELL TO BE CREATED AT THE INFLOW
0085C                  BOUNDARY IN THE X- AND Y-DIRECTIONS
0086C     ULL      : PRESCRIBED INFLOW VELOCITY
0087C     URR      : PRESCRIBED OUTFLOW VELOCITY
0088C                  OUTFLOW CONTINUATIVE IF URR=0.
0089C     RLL      : PRESCRIBED INFLOW DENSITY
0090C   CARD NO.6
0091C     IPN      : PARTICLE TYPE CODE '1'(PA),'2'(PB),'3-9'(H)
0092C     NX,NY    : # OF PARTICLES/CELL TO BE CREATED FOR THIS PART
0093C                  IN THE X- AND Y-DIRECTIONS
0094C     XC,YC,XD,YD : PART DIMENSIONS IN PROBLEM UNITS
0095C     UO,VO    : INITIAL VELOCITY COMPONENT OF THE PART
0096C     RO       : INITIAL DENSITY OF THE PART
0097C----
0098C    TAPE RESTART IF IBAR=0 IN CARD NO.2
0099C          1. NAME    :FORMAT(18A4)
0100C          2. IBAR=0  (BLANK CARD)
0101C          3. IP2,JP2:FORMAT(2I5)
0102C          4. TAPE,TWFIN,IPR,IW,IRF,TDT,TPT
0103C----
0104C   COMMENT
0105C       ITYPE = 0  ; NO-INFLOW/OUTFLOW
0106C       ITYPEL ｶﾞ 1 - 7 ﾉ ﾄｷ UL=CONST. & RL=CONST.
0107C       ITYPER ｶﾞ 1- 8 ﾃﾞｶﾂ URR=0 ﾉﾄｷ ﾊ CONTINUATIVE OUTFLOW
0108C       ITYPEL=8  READ RL(L1--L9)      ( UL=CONST. )
0109C       ITYPEL=9  READ RL(L1--L9) & UL(L1--L2)
0110C       ITYPER=9  READ UR(L3--L4)
0111C       ITYPEL=3,4,5 (RB-IN),
0112C              =1,2   (RA-IN)
0113C      TYPE ｶｰﾄﾞ ﾊ 2 ﾏｲ ﾃﾞ ﾋﾄｸﾐ (ITYPE ｶﾞ 0 ｲｶ ﾉ ﾄｷ ﾊ 1 ｸﾐ, ITYPE ｶﾞ ｾｲ
0114C          ﾉﾄｷ ﾊ ﾌｸｽｳ ｸﾐ ﾃﾞﾓ ﾖｲ. ﾀﾀﾞｼ ｻｲｺﾞ ﾊ ITYPE ｶﾞ ｾﾞﾛ ﾉ ｸﾐ)
0115C      IPN => 3 ﾉﾄｷ
0116C         XC: ﾌ ﾅﾗﾊﾞ CONFINED FLOW, ｾｲ ﾅﾗﾊﾞ H ｼﾖｳ ｾｽﾞ.
0117C         YC: H ｵ ｱﾀｴﾙ.
0118C         XD: ﾌ ﾉﾄｷ UF ﾅｼ.
0119C         YD: ﾌ ﾉﾄｷ USE 'DENST'
0120C      IPN >=4 ﾅﾗﾊﾞ ICYCLE=0 / PRINT ﾅｼ
0121C      IPN >=7 ﾅﾗﾊﾞ ICYCLE=0 / LPLT ﾅｼ
0122C      IPN=3,4,7 ﾉﾄｷ ITER-PRINT ｱﾘ.
0123C      # OF OBSTACLES SHOULD BE LESS THAN OR EQUAL TO 'LB'
0124C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
0125       IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
0126       PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
0127       PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
0128       CHARACTER LNAME*40
```

資料３—②

```
0129        COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
0130       - ICOR,IGT,
0131       1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
0132       2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
0133       + L80B(LB),
0134       3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME,
0135       4 IFL(MI,MJ),KF(MI,MJ)
0136        COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
0137       1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
0138       2 YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
0139       3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
0140       4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,YH,
0141       5 U(MI,MJ),V(MI,MJ),UTIL(MI,MJ),VTIL(MI,MJ),PPP(MI,MJ),R(MI,MJ),
0142       6 VIS(MI,MJ),H(LPS),RA,RB
0143C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
0144        DATA LNAME/'  TAKEUCHI / PROG110D-V03 / 1982.07. /   '/
0145     1 FORMAT(2I5,5F10.0)
0146     2 FORMAT('0  DATA ERROR (IP2,JP2)',2I10)
0147     3 FORMAT(18A4)
0148     4 FORMAT(1H1//'  DATA NAME=',18A4)
0149C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
0150        IBND=1
0151        IFUL=2
0152        ISUR=3
0153        IEMP=4
0154        IOB=5
0155        ICOR=6
0156        IGT= 7
0157C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
0158        READ(5,3) NAME
0159        WRITE(6,4) NAME
0160    10 READ(5,1)IBAR,JBAR,DX,DY,DT,BO
0161        IP2=IBAR+2
0162        JP2=JBAR+2
0163        IF(IBAR.EQ.0)READ(5,1)IP2,JP2
0164        IF(IBAR)30,20,20
0165    20 CONTINUE
0166        IALL=IP2*JP2
0167        IF(IP2.GT.MI.OR.JP2.GT.MJ.OR.IP2.LE.2.OR.JP2.LE.2) GOTO 90
0168        CALL PROG(IP2,JP2)
0169C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
0170    30 STOP 'END OF JOB'
0171    90 WRITE(6,2) IP2,JP2
0172        STOP ' DATA ERROR '
0173        END
0174        SUBROUTINE BNDARY(IP2,JP2,ICN)
0175        IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
0176        PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
0177        PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
0178        COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
0179       - ICOR,IGT,
0180       1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
0181       2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
0182       + L80B(LB),
0183       3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
0184       4 IFL(MI,MJ),KF(MI,MJ)
0185        COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
0186       1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
0187       2 YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
0188       3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
0189       4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,YH,
0190       5 U(MI,MJ),V(MI,MJ),UTIL(MI,MJ),VTIL(MI,MJ),PPP(MI,MJ),R(MI,MJ),
0191       6 VIS(MI,MJ),H(LPS),RA,RB
0192    42 FORMAT('   RMM=',1PE15.6)
0193C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
0194        GOTO (100,200,300,400,500,600),ICN
```

```
CCC
C100  JUST OUTSIDE TANGENTIAL VELOCITIES
CCC
  100 CONTINUE
      IF(XC.LT.0.0) GOTO 151
      DO 150 J=2,JP1
      DO 150 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 150
      IF(XC.GT.0.0) GOTO 110
      RSQ=1.0D0/SQRT(DX**2+((H(I+1)-H(I))*DY)**2)
      ACOS=DX*RSQ
      ASIN=(H(I+1)-H(I))*DY*RSQ
      RMM=ACOS**2-ASIN**2
      IF(RMM.LE.1.0D-3)GOTO 149
      RRM=1.0D0/RMM
      U(I,J+1)=U(I,J)-2.0*ACOS*ASIN*DY*RRM
     1 *(0.5*RDY*(V(I,J)+V(I+1,J)-V(I,J-1)-V(I+1,J-1))
     2  -0.5*RDX*(U(I+1,J)-U(I-1,J)))
     3 -DYODX*(V(I,J)-V(I-1,J))
      GOTO 150
  110 CONTINUE
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP.AND.IFL(I+1,J+1).EQ.IEMP
     * .AND.IFL(I,J+1).LT.IEMP) V(I+1,J)=V(I,J)-DXODY*(U(I,J+1)-U(I,J))
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP.AND.IFL(I+1,J+1).EQ.IEMP
     * .AND.IFL(I+1,J).LT.IEMP) U(I,J+1)=U(I,J)-DYODX*(V(I+1,J)-V(I,J))
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP.AND.IFL(I-1,J+1).EQ.IEMP.AND.
     * IFL(I,J+1).LT.IEMP) V(I-1,J)=V(I,J)+DXODY*(U(I-1,J+1)-U(I-1,J))
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP.AND.IFL(I+1,J-1).EQ.IEMP.AND.
     * IFL(I+1,J).LT.IEMP) U(I,J-1)=U(I,J)+DYODX*(V(I+1,J-1)-V(I,J-1))
      GOTO 150
  149 WRITE(6,42) RMM
      STOP 'ERROR (RMM)'
  150 CONTINUE
  151 CONTINUE
CCC
      DO 160 I=2,IP1
      U(I,1)=U(I,2)*BCB
  160 U(I,JP2)=U(I,JP1)*BCT
      DO 170 J=2,JP1
      V(1,J)=V(2,J)*BCLT(J)
  170 V(IP2,J)=V(IP1,J)*BCRT(J)
      RETURN
CCC
C200  JUST INSIDE OBSTACLE VELOCITIES
CCC
  200 IF(ITYPE.EQ.0)RETURN
      DO 250 J=2,JP1
      DO 250 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).LT.IOB) GOTO 240
      U(I,J)=0.0
      V(I,J)=0.0
      IF(IFL(I,J+1).LT.IOB.AND.IFL(I+1,J).GE.IOB)  U(I,J)=U(I,J+1)*BCB
      IF(IFL(I,J-1).LT.IOB.AND.IFL(I+1,J).GE.IOB)  U(I,J)=U(I,J-1)*BCB
      IF(IFL(I-1,J).LT.IOB.AND.IFL(I,J+1).GE.IOB)  V(I,J)=V(I-1,J)*BCB
      IF(IFL(I+1,J).LT.IOB.AND.IFL(I,J+1).GE.IOB)  V(I,J)=V(I+1,J)*BCB
      GOTO 250
  240 CONTINUE
      IF(IFL(I+1,J).GE.IOB)  U(I,J)=0.0
      IF(IFL(I,J+1).GE.IOB)  V(I,J)=0.0
  250 CONTINUE
      RETURN
CCC
C300  SURFACE VELOCITIES
CCC
  300 CONTINUE
      IF(XC.LT.0.0) RETURN
      DO 370 J=2,JP1
      DO 370 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 370
      N=0
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)N=N+1
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)N=N+2
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)N=N+4
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)N=N+8
      GOTO (351,352,353,354,351,355,352,357,358,352,351,359,351,352,351)
     # ,N
  351 U(I,J)=U(I-1,J)-DXODY*(V(I,J)-V(I,J-1))
      GOTO 370
  352 V(I,J)=V(I,J-1)-DYODX*(U(I,J)-U(I-1,J))
      GOTO 370
  353 U(I,J)=U(I-1,J)
      GOTO 356
  354 U(I-1,J)=U(I,J)+DXODY*(V(I,J)-V(I,J-1))
      GOTO 370
  355 U(I-1,J)=U(I,J)
  356 V(I,J)=V(I,J-1)
      GOTO 370
  357 V(I,J-1)=V(I,J)+DYODX*(U(I,J)-U(I-1,J))
      GOTO 370
  358 U(I,J)=U(I-1,J)
      GOTO 360
  359 U(I-1,J)=U(I,J)
  360 V(I,J-1)=V(I,J)
  370 CONTINUE
      RETURN
CCC
C400  BOUNDARY DENSITIES
CCC
  400 CONTINUE
      IF(XC.LT.0.0) GOTO 480
      DO 470 J=2,JP1
      DO 470 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 470
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)R(I+1,J)=R(I,J)
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)R(I,J+1)=R(I,J)
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)R(I-1,J)=R(I,J)
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)R(I,J-1)=R(I,J)
  470 CONTINUE
  480 CONTINUE
      IF(ITYPE.EQ.0)GOTO 460
      DO 450 J=2,JP1
      DO 450 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).LT.IOB)  GOTO 450
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IFUL.OR.IFL(I,J-1).EQ.ISUR)  R(I,J)=R(I,J-1)
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IFUL.OR.IFL(I-1,J).EQ.ISUR)  R(I,J)=R(I-1,J)
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IFUL.OR.IFL(I+1,J).EQ.ISUR)  R(I,J)=R(I+1,J)
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IFUL.OR.IFL(I,J+1).EQ.ISUR)  R(I,J)=R(I,J+1)
  450 CONTINUE
  460 CONTINUE
      DO 410 I=2,IP1
      R(I,1)=R(I,2)
  410 R(I,JP2)=R(I,JP1)
      DO 420 J=2,JP1
      IF(UL(J).NE.0.0)  GOTO 415
      R(1,J)=R(2,J)
  415 R(IP2,J)=R(IP1,J)
  420 CONTINUE
      RETURN
CCC
C500  BOUNDARY  VISCOSITIES
CCC
  500 CONTINUE
```

```
      DO 510 I=2,IP1
      VIS(I,1)=VIS(I,2)
  510 VIS(I,JP2)=VIS(I,JP1)
      DO 520 J=2,JP1
      VIS(1,J)=VIS(2,J)
  520 VIS(IP2,J)=VIS(IP1,J)
      IF(ITYPE.EQ.0)GOTO 560
      DO 550 J=2,JP1
      DO 550 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).LT.IOB) GOTO 550
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IFUL.OR.IFL(I,J-1).EQ.ISUR) VIS(I,J)=VIS(I,J-1)
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IFUL.OR.IFL(I-1,J).EQ.ISUR) VIS(I,J)=VIS(I-1,J)
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IFUL.OR.IFL(I+1,J).EQ.ISUR) VIS(I,J)=VIS(I+1,J)
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IFUL.OR.IFL(I,J+1).EQ.ISUR) VIS(I,J)=VIS(I,J+1)
  550 CONTINUE
  560 CONTINUE
CCC
  600 CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE LPLT2(NX,NY,NPA,PA,NPB,PB)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*4 PA,PB
      REAL*4 XS,YS
      CHARACTER*1 LPLOT,LBLANK,LSTRK,LMINUS,LSHARP,LASTER,LXXX,LSURF
      PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
      PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
      PARAMETER LIMAX=500,LJMAX=100
      PARAMETER LPA=100000,LPB=100000
      COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
     - ICOR,IGT,
     1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
     2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
     + L80B(LB),
     3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
     4 I1(LDM),I2(LDM)
      COMMON/RC/TAPE,B0,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
     1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
     2 YC,YD,YDIS,YTE,U0,V0,R0,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),G0(MG),
     3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
     4 T0,T,TWPRT,TUT,TPRT,TT,YH,
     5 A1(LDM),A2(LDM),A3(LDM),A4(LDM),A5(LDM),
     6 A6(LDM),A7(LDM),H(LPS),RA,RS
      DIMENSION LPLOT(LJMAX,LIMAX)
      DIMENSION PA(LPA),PB(LPB)
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      DATA LBLANK,LSTRK,LMINUS,LSHARP,LASTER,LXXX,LSURF
     #  /' ','I','-','#','*','X','S'/
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
    1 FORMAT(1H1)
    2 FORMAT('0 IMAX=',I5,'  IMAX>LIMAX RANGE OVER IN LPLOT')
    3 FORMAT('0 JMAX=',I5,'  JMAX>LJMAX RANGE OVER IN LPLOT')
    4 FORMAT(1H ,130A1)
    5 FORMAT(' (SUB.LPLT2)    ',10A4)
    6 FORMAT(1H0)
   12 FORMAT(3X,18A4,'  T=',1PD12.5,'  ICYCLE=',I5,'  DATE=',2A4)
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
 1000 IXS=NX
      IYS=(NY*3)/2
      IF(NX.EQ.0.OR.NY.EQ.0) RETURN
      XS=FLOAT(IXS)
      YS=FLOAT(IYS)
      IMAX=IBAR*IXS+1
      JMAX=JBAR*IYS+1
      IF(IMAX.LE.LIMAX) GOTO 1010
      WRITE(6,2) IMAX
```

```
      NX=NX/2
      NY=NY/2
      GOTO 1000
 1010 IF(JMAX.LE.LJMAX) GOTO 1020
      WRITE(6,3) JMAX
      NX=NX/2
      NY=NY/2
      GOTO 1000
 1020 CONTINUE
CCC
C  INITIAL CLEAR
CCC
      DO 100 I=1,IMAX
      DO 100 J=1,JMAX
  100 LPLOT(J,I)=LBLANK
CCC
C  FRAME
CCC
      DO 110 I=1,IMAX,IXS
      DO 110 J=1,JMAX
  110 LPLOT(J,I)=LMINUS
      DO 120 I=1,IMAX
      DO 120 J=1,JMAX,IYS
  120 LPLOT(J,I)=LSTRK
      DO 130 I=1,IMAX,IXS
      DO 130 J=1,JMAX,IYS
  130 LPLOT(J,I)=LSHARP
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C....
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      IF(NPA.EQ.0)GOTO 141
      DO  140 K=1,NPA
      I=PA(2*K-1)*XS+1.5
      J=PA(2*K)*YS+1.5
      IF(I.GT.LIMAX.OR.J.GT.LJMAX) GOTO 140
      LPLOT(J,I)=LASTER
  140 CONTINUE
CCC
  141 CONTINUE
      IF(NPB.EQ.0)GOTO 151
      DO 150 K=1,NPB
      I=PB(2*K-1)*XS+1.5
      J=PB(2*K)*YS+1.5
      IF(I.GT.LIMAX.OR.J.GT.LJMAX) GOTO 150
      LPLOT(J,I)=LXXX
  150 CONTINUE
CCC
  151 CONTINUE
      IF(XC.NE.0.0) GOTO 161
      DO 160 K=2,IBAR+2
      I=FLOAT(K-2)*XS+1.5
      J=H(K)*YS+1.5
      IF(I.GT.LIMAX.OR.J.GT.LJMAX) GOTO 160
      LPLOT(J,I)=LSURF
  160 CONTINUE
  161 CONTINUE
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
CCC
C    PLOT ON L/P
CCC
      WRITE(6,1)
      WRITE(6,5) LNAME
      WRITE(6,12) NAME,T,ICYCLE,IDATE
      WRITE(6,6)
      DO 200 I=1,IMAX
      WRITE(6,4) (LPLOT(J,I),J=1,JMAX)
  200 CONTINUE
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      WRITE(6,1)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE MARKER(IP2,JP2,NP,KP,XP)
C   MOVE & PACK MARKER PARTICLES
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*4 XP
      PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
      PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
      PARAMETER LPA=100000,LPB=100000
      PARAMETER LXP=LPA
      COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
     - ICOR,IGT,
     1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
     2 NXS,NYS,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
     + L80B(LB),
     3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
     4 IFL(MI,MJ),KF(MI,MJ)
      COMMON/RC/TAPE,BO,SCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
     1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
     2 YC,YD,YDIS,YTE,U0,V0,R0,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
     3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
     4 TO,T,TWPRT,TUT,TPRT,TT,YH,
     5 U(MI,MJ),V(MI,MJ),UTIL(MI,MJ),VTIL(MI,MJ),PPP(MI,MJ),R(MI,MJ),
     6 VIS(MI,MJ),H(LPS),RA,RB
      DIMENSION XP(LXP)
      NPT=0
      NPN=0
      K=1
      KN=1
  100 IF(NPT.GE.NP)GOTO 140
      ID=XP(K)+2.0
      IR=XP(K)+1.5
      JD=XP(K+1)+2.0
      JR=XP(K+1)+1.5
      U1=U(ID,JR)
      U2=U(ID,JR+1)
      U3=U(ID-1,JR+1)
      U4=U(ID-1,JR)
      V1=V(IR,JD)
      V2=V(IR,JD-1)
      V3=V(IR+1,JD-1)
      V4=V(IR+1,JD)
      IF(ITYPE.EQ.0) GOTO 99
C
C     WHICH QUARTER?
      IF(ID.NE.IR) GOTO 12
      IF(JD.NE.JR) GOTO 10
      N1=1
      GOTO 19
   10 N1=2
      GOTO 19
   12 IF(JD.EQ.JR) GOTO 14
      N1=3
      GOTO 19
   14 N1=4
   19 CONTINUE
C     UK-COR CHECK.
      N2=0
      IF(IFL(ID+1,JR).NE.ICOR.OR.IFL(ID+1,JR+1).GE.IOB) GOTO 20
      N2=N2+1
      GOTO 29
   20 IF(IFL(ID+1,JR+1).NE.ICOR.OR.IFL(ID+1,JR).GE.IOB) GOTO 22
      N2=N2+2
      GOTO 29
   22 IF(IFL(ID-1,JR+1).NE.ICOR.OR.IFL(ID-1,JR).GE.IOB) GOTO 24
      N2=N2+4
      GOTO 29
   24 IF(IFL(ID-1,JR).NE.ICOR.OR.IFL(ID-1,JR+1).GE.IOB) GOTO 29
      N2=N2+8
   29 CONTINUE
C     VK-COR CHECK.
      N3=0
      IF(IFL(IR,JD-1).NE.ICOR.OR.IFL(IR+1,JD-1).GE.IOB) GOTO 30
      N3=N3+1
      GOTO 39
   30 IF(IFL(IR+1,JD-1).NE.ICOR.OR.IFL(IR,JD-1).GE.IOB) GOTO 32
      N3=N3+2
      GOTO 39
   32 IF(IFL(IR+1,JD+1).NE.ICOR.OR.IFL(IR,JD+1).GE.IOB) GOTO 34
      N3=N3+4
      GOTO 39
   34 IF(IFL(IR,JD+1).NE.ICOR.OR.IFL(IR+1,JD+1).GE.IOB) GOTO 39
      N3=N3+8
   39 CONTINUE
C     RESET U1-U4.
      IF(N2.EQ.0.OR.N2.GE.11) GOTO 49
      GOTO (40,42,49,44,40,42,49,46,40,42),N2
   40 IF(N1.EQ.1.OR.N1.EQ.4) U2=0.0
      IF(N2.EQ.5) GOTO 44
      IF(N2.EQ.9) GOTO 46
      GOTO 49
   42 IF(N1.EQ.2.OR.N1.EQ.3) U1=0.0
      IF(N2.EQ.6) GOTO 44
      IF(N2.EQ.10) GOTO 46
      GOTO 49
   44 IF(N1.EQ.2.OR.N1.EQ.3) U4=0.0
      GOTO 49
   46 IF(N1.EQ.1.OR.N1.EQ.4) U3=0.0
   49 CONTINUE
C     RESET V1-V4.
      IF(N3.EQ.0.OR.N3.GE.11) GOTO 59
      GOTO (50,52,59,54,50,52,59,56,50,52),N3
   50 IF(N1.LE.2) V3=0.0
      IF(N3.EQ.5) GOTO 54
      IF(N3.EQ.9) GOTO 56
      GOTO 59
   52 IF(N1.GE.3) V1=0.0
      IF(N3.EQ.6) GOTO 54
      IF(N3.EQ.10)GOTO 56
      GOTO 59
   54 IF(N1.GE.3) V2=0.0
      GOTO 59
   56 IF(N1.LE.2) V4=0.0
   59 CONTINUE
C
   99 CONTINUE
      HPX=ID-1.0-XP(K)
      HMX=1.0-HPX
      HPY=JR-0.5-XP(K+1)
      HMY=1.0-HPY
      UK=HPX*(HMY*U3+HPY*U4)+HMX*(HMY*U2+HPY*U1)
      HPX=IR-0.5-XP(K)
      HMX=1.0-HPX
      HPY=JD-1.0-XP(K+1)
      HMY=1.0-HPY
      VK=HPX*(HMY*V1+HPY*V2)+HMX*(HMY*V4+HPY*V3)
      XP(KN)=XP(K)+UK*DTODX
      XP(KN+1)=XP(K+1)+VK*DTODY
      I=XP(KN)+2.0
```

資料 3 —⑤

```
      J=XP(KN+1)+2.0
      IF(ITYPE.EQ.0)GOTO 110
      IF(XP(KN).LE.-1.OR.XP(KN+1).LE.-1.
     # OR.XP(KN+1).GE.JP1) GOTO 900
      IF(XP(KN).GE.IBAR)GOTO 130
      GOTO 115
  110 IF(XP(KN).GE.IP1.OR.XP(KN).LE.-1.OR.XP(KN+1).GE.JP1.
     # OR.XP(KN+1).LE.-1) GOTO 900
  115 KN=KN+2
      NPN=NPN+1
  120 IF(IFL(I,J).NE.IEMP)GOTO 130
      IFL(I,J)=ISUR
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)U(I,J)=U(ID,JD)
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)U(I-1,J)=U(ID-1,J)
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)V(I,J)=V(ID,JD)
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)V(I,J-1)=V(ID,JD-1)
  130 K=K+2
      NPT=NPT+1
      GOTO 100
  140 NP=NPN
      KP=KN
      RETURN
  900 WRITE(6,90) KN,NPN,XP(KN),XP(KN+1),UK,VK
   90 FORMAT('  KN=',I5,'  NPN=',I4,'  XP=',2D15.7,
     # '  UK,VK=',2D15.7)
      STOP 'MARKER ERROR'
      END
      SUBROUTINE PROG(IP2,JP2)
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*4 FL,PA,PB
      PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
      PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
      PARAMETER LPA=100000,LPB=100000
      PARAMETER LOBST=LB,LJBAR=MJ-2
      PARAMETER LIALL=54+4*LB,LRALL=47+7*MJ+2*MG
      COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
     - ICOR,IGT,
     1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
     2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L5OB(LB),L6OB(LB),L7OB(LB),
     + L8OB(LB),
     3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
     4 IFL(MI,MJ),KF(MI,MJ)
      COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
     1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
     2 YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
     3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
     4 TO,T,TUPRT,TUT,TPRT,TT,YH,
     5 U(MI,MJ),V(MI,MJ),UTIL(MI,MJ),VTIL(MI,MJ),PPP(MI,MJ),R(MI,MJ),
     6 VIS(MI,MJ),H(LPS),RA,RB
      DIMENSION ICALL(LIALL),RCALL(LRALL)
      EQUIVALENCE  (ICALL(1),IBAR),(RCALL(1),BO)
       EQUIVALENCE (L13,IPN)
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      DIMENSION A7(LDM)
      EQUIVALENCE(VIS(1,1),A7(1))
      DIMENSION PA(LPA),PB(LPB),HS(MI),HD(LPS)
      DIMENSION FL(8)
         DATA FL/'BND','FUL','SUR','EMP','OB','COR','GATE','XX'/
      DIMENSION NNAME(18)
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
    1 FORMAT(1H1)
    2 FORMAT(18A4)
    3 FORMAT(4F3.0,F8.0,4F10.0)
    4 FORMAT(5F10.0,I1,2X,I2)
    5 FORMAT('  IBAR=',I4,'  JBAR=',I4,'  DX=',F8.3,'  DY=',F8.3,
     # '  DT=',F8.5,'   BO=',F8.5)
    6 FORMAT('  BC(B,L,T,R)=',4(F4.1,1X),'  VNU=',F8.4,'  EPSD=',F8.5,
     # '  GX=',F8.3,'  GY=',F8.3)
    7 FORMAT('  T=',F8.5,'  TUPRT=',F8.5,'  TUT=',F8.5,'  TWFIN=',F8.5,
     # '  XPR=',F8.5,'  IPR=',I2,'  IW=',I2)
    8 FORMAT(I3,2I1,15I5/3F10.0)
    9 FORMAT('  ITYPE=',I3,'  ITYPEL=',I1,'  ITYPER=',I1,'  L1=',I3,
     # '  L2=',I3,'  L3=',I3,'  L4=',I3,'  L5=',I3,'  L6=',I3,
     # '  L7=',I3,'  L8=',I3,'  L9=',I3,'  L10=',I3,'  L11=',I3,
     # /'   L12=',I3,'  L13=',I3,'  NXB=',I3,'   NYB=',I3,
     # '  ULL=',F8.4,'  URR=',F8.4,'  RLL=',F8.5)
   10 FORMAT('   NUMBER OF CELLS IN SYSTEM      IALL=',I5)
   11 FORMAT(8F10.0)
   12 FORMAT('0  NG=',I5)
   13 FORMAT(10X,'GT=',F8.4,5X,'GO=',F8.3)
   14 FORMAT('0   NO OBST OR I/O BOUNDARIES')
   15 FORMAT(I1,I4,I5,7F10.0)
   16 FORMAT('  IPN=',I2,'  NX=',I3,'  NY=',I3,'  XC=',F8.4,'  YC=',
     # F8.4,'  XD=',F8.4,'  YD=',F8.4,'  UO=',F8.4,'  VO=',F8.4,
     # '  RO=',F8.5)
   17 FORMAT('0  STORAGE (PA) EXAUSTED',I10)
   18 FORMAT('0  STORAGE (PB) EXAUSTED',I10)
   19 FORMAT('   NUMBER OF PARTICLES IN SYSTEM   NPA=',I5,'   NPB=',I5)
   20 FORMAT(1H ,70X,'CTSL=',F10.4,'   CTIME=',F10.4,' (SEC)')
   21 FORMAT(2X,18A4,'  T=',1PD12.5,'  ICYCLE=',I5,'  IDATE=',2A4)
   22 FORMAT('     I',4X,'J',4X,'FLAG',11X,'U',11X,'V',9X,'PIJ',11X,'D',
     # 9X,'UIJ',9X,'VIJ',11X,'R',9X,'VIS')
   23 FORMAT(1H ,2I5,4X,A4,1P9D12.4)
   24 FORMAT('  NUMTD=',I4,'   T=',1PD12.5,'   ICYCLE=',I5)
   25 FORMAT(1H0,'IP2=',I4,4X,'JP2=',I4)
   26 FORMAT('   TDT=',F8.5,'   TPT=',F8.5)
   27 FORMAT('  J=',I3,'  KF=',30I4)
   28 FORMAT(1H0)
   29 FORMAT(2F10.0,I1,2I2,5X,3F10.0)
   30 FORMAT('  RESTARTING FROM NUMTD=',I5)
   31 FORMAT('   TIME=',1PD12.5,'   ICYCLE=',I5,'   ITERD=',I4,
     # '  DMAX=',D12.5,5X,'(',I3,',',I3,')')
   32 FORMAT('0  STORAGE (PD) EXAUSTED',I10)
   33 FORMAT('   CONFINED FLOW')
   34 FORMAT('   H ',10F12.4)
   35 FORMAT('   USE SURFACE VARIABLE(H)')
   36 FORMAT('   J,UL'/5(I5,F15.4))
   37 FORMAT('   J,RL'/5(I5,F15.4))
   38 FORMAT('   J,UR'/5(I5,F15.4))
   39 FORMAT('   IDATE=',2A4)
   40 FORMAT('   TAPE=',F8.5,'  TWFIN=',F8.5,'  IPR=',I2,'  IW=',I2,
     * '  IRF=',I2)
   41 FORMAT(12X,30A4)
   42 FORMAT('   USE UF ROUTINE')
   43 FORMAT('   USE DENST ROUTINE')
   44 FORMAT('   USE VISCO ROUTINE')
   45 FORMAT(1H ,2I5,4X,A4,1P3D12.4,36X,2D12.4)
   46 FORMAT('  ARRAY SIZE PARAMETER (MI,MJ,LB,MG,LPA,LPB)'/6I8)
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C    *     *     *     *     *     *     *     *     *     *     *     *     *    * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      CALL DATIM(IDATE,CTM)
      CALL PTIME(CT1)
      CTS=CT1
      LPX=4
      LPY=4
      WRITE(6,2) LNAME
      WRITE(6,46) MI,MJ,LB,MG,LPA,LPB
      IF(IBAR.EQ.0)GOTO 460
      READ(5,3) BCB,BCL,BCT,BCR,VNU,EPSD,GX,GY,CTMAX
      IF(CTMAX.EQ.0.0) CTMAX=0.25
      CTMAX=CTMAX*0.95
      READ(5,4) TO,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW
      IF(EPSD.LE.0.0) EPSD=0.001
      IF(GY.EQ.0.) GY=-980.D0
      IF(TO.LT.0.0) TO=0.0
      IF(XPR.LE.0.0) XPR=TWPRT
      IF(IPR.LT.1.OR.IPR.GT.4) IPR=3
      IF(BO.EQ.0.D0) BO=1.9D0
      WRITE(6,39) IDATE
      WRITE(6,5) IBAR,JBAR,DX,DY,DT,BO
      WRITE(6,6) BCB,BCL,BCT,BCR,VNU,EPSD,GX,GY
      WRITE(6,7) TO,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C    DATA CHECK
CCC
      IF(DX.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (DX)'
      IF(DY.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (DY)'
      IF(DT.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (DT)'
      IF(TWPRT.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWPRT)'
      IF(TWT.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWT)'
      IF(TWFIN.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWFIN)'
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      DO 51 I=1,IALL
   51 A7(I)=VNU
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
CCC
      IP1=IBAR+1
      JP1=JBAR+1
      RDT=1.0D0/DT
      RDX=1.0D0/DX
      RDX2=RDX*RDX
      RDY=1.0D0/DY
      RDY2=RDY*RDY
      RDXDY=RDX*RDY
      DTODX=DT*RDX
      DTODY=DT*RDY
      DXODY=DX*RDY
      DYODX=DY*RDX
      BETA = BO*0.5D0*RDT/(RDX2+RDY2)
      TPRT=TWPRT
      TT=TWT
      TWPRT=TPRT+TO
      TWT=TT+TO
      ICYCLE=0
      NUMTD=0
      NUMPR=0
      IXP=0
      IXPR=XPR*RDT+1.001D0
      IGATE=0
      IOBST=1
      NOBST=0
CCC
CCC   ｷﾖｳｶｲ ｾﾙ
CCC
      DO 60 J=2,JP1
      DO 60 I=2,IP1
      IFL(I,J)=IEMP
      IF(I.EQ.2)IFL(I-1,J)=IBND
      IF(J.EQ.2)IFL(I,J-1)=IBND
      IF(I.EQ.IP1)IFL(I+1,J)=IBND
      IF(J.EQ.JP1)IFL(I,J+1)=IBND
   60 CONTINUE
CCC
CCC   ﾘﾕｳﾆﾕｳ/ﾘﾕｳｼﾕﾂ ｾﾙ
CCC
      DO 65 J=1,JP2
      BCLT(J)=BCL
      BCRT(J)=BCR
      ROS(J)=1.0D0
      UL(J)=0.0
      UR(J)=0.0
      RL(J)=1.0
   65 CONTINUE
CCC
CCC   ﾀｲﾌﾟｶｰﾄﾞ ﾖﾐﾄﾘｼﾖﾘ
CCC
   69 CONTINUE
      READ(5,8) ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,
     # L11,L12,L13,NXB,NYB,ULL,URR,RLL
      WRITE(6,9) ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,
     # L10,L11,L12,L13,NXB,NYB,ULL,URR,RLL
      IF(ITYPEL.LT.6)L9=L2
      IF(ITYPEL.LT.2)L9=L1
      IF(L9.NE.L2) RA=RLL
      IF(L9.NE.L1) RB=RLL
      IF(ITYPE)70,90,80
   70 READ(5,8) NG
      WRITE(6,12) NG
      IF(NG.LE.0) STOP 'DATA ERROR (NG)'
      READ(5,11)(GT(I),GO(I),I=1,NG)
      WRITE(6,13) (GT(I),GO(I),I=1,NG)
      ASSIGN 100 TO KRET
      GOTO 160
   80 ASSIGN 69 TO KRET
      GOTO 150
   90 CONTINUE
      IF(IOBST.NE.1) ITYPE=IOBST-1
      IF(ITYPE.EQ.0) WRITE(6,14)
      IF(ITYPE.EQ.0) GOTO 100
      DO 95 J=2,JP1
      DO 95 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.IOB) GOTO 95
      N=0
      M=0
      IF(IFL(I+1,J).GE.IOB) N=N+1
      IF(IFL(I,J+1).GE.IOB) N=N+2
      IF(IFL(I-1,J).GE.IOB) N=N+4
      IF(IFL(I,J-1).GE.IOB) N=N+8
      IF(IFL(I+1,J).GE.IFUL.AND.IFL(I+1,J).LE.IEMP) M=M+1
      IF(IFL(I,J+1).GE.IFUL.AND.IFL(I,J+1).LE.IEMP) M=M+2
      IF(IFL(I-1,J).GE.IFUL.AND.IFL(I-1,J).LE.IEMP) M=M+4
      IF(IFL(I,J-1).GE.IFUL.AND.IFL(I,J-1).LE.IEMP) M=M+8
      IF(N.EQ.0) GOTO 93
      IF(N.EQ.1.AND.M.EQ.4) GOTO 93
      IF(N.EQ.2.AND.M.EQ.8) GOTO 93
       IF(N.EQ.3.AND.M.EQ.12) GOTO 93
      IF(N.EQ.4.AND.M.EQ.1) GOTO 93
      IF(N.EQ.6.AND.M.EQ.9) GOTO 93
      IF(N.EQ.8.AND.M.EQ.2) GOTO 93
      IF(N.EQ.9.AND.M.EQ.6) GOTO 93
      IF(N.EQ.12.AND.M.EQ.3) GOTO 93
      GOTO 95
   93 IFL(I,J)=ICOR
   95 CONTINUE
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
CCC   ﾏｰｶｰ ﾉ ｾﾂﾃｲ
CCC
  100 KA=1
      NPA=0
      KB=1
      NPB=0
      KNA=1
```

資料 3 —⑦

```
      KNB=1
      YMAX=1.5D0
  105 CONTINUE
      READ(5,15) IPN,NX,NY,XC,YC,XD,YD,U0,V0,R0
      WRITE(6,16) IPN,NX,NY,XC,YC,XD,YD,U0,V0,R0
      IF(IPN.EQ.1)RA=R0
      IF(IPN.EQ.2)RB=R0
      XC=XC*RDX
      XD=XD*RDX
      YC=YC*RDY
      YD=YD*RDY
      YMAX=MAX(YMAX,YD+1.5D0)
      IF(IPN.GE.3)  GOTO 140
      LPX=MAX0(NX,NXB,LPX)
      LPY=MAX0(NY,NYB,LPY)
      IF(NX.EQ.0)GOTO 126
      XTE=1.0D0/NX
      YTE=1.0D0/NY
      Y=YTE*0.5D0
  110 X=XTE*0.5D0
  115 IF(X.GE.XC.AND.X.LE.XD.AND.Y.GE.YC.AND.Y.LE.YD)GOTO 120
      GOTO 125
  120 I=X+2.0D0
      J=Y+2.0D0
      IF(IFL(I,J).GE.IOB)  GOTO 125
      GOTO  (121,122),IPN
  121 PA(KA)=X
      PA(KA+1)=Y
      KA=KA+2
      IF(KA.GT.LPA)GOTO 130
      NPA=NPA+1
      GOTO 124
  122 PB(KB)=X
      PB(KB+1)=Y
      KB=KB+2
      IF(KB.GT.LPB)GOTO 131
      NPB=NPB+1
  124 IFL(I,J)=IFUL
      R(I,J)=R0
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IBND)U(I,J)=U(I,J)*ROS(J)+U0*(1.0D0-ROS(J))
      IF(IFL(I+1,J).GT.IBND.AND.IFL(I+1,J).LT.IOB)  U(I,J)=U0
      IF(IFL(I-1,J).GT.IBND.AND.IFL(I-1,J).LT.IOB)  U(I-1,J)=U0
      IF(IFL(I,J-1).GT.IBND.AND.IFL(I,J-1).LT.IOB)  V(I,J-1)=V0
      IF(IFL(I,J+1).GT.IBND.AND.IFL(I,J+1).LT.IOB)  V(I,J)=V0
  125 X=X+XTE
      IF(X.LT.IBAR)GOTO 115
      Y=Y+YTE
      IF(Y.LT.JBAR)GOTO 110
      GOTO 105
  126 IS=XC+2.0D0
      IE=XD+1.0D0
      JS=YC+2.0D0
      JE=YD+1.0D0
      DO 128  J=JS,JE
      DO 128  I=IS,IE
      IF(IFL(I,J).GE.IOB)  GOTO 128
      IFL(I,J)=IFUL
      R(I,J)=R0
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IBND)U(I,J)=U(I,J)*ROS(J)+U0*(1.0D0-ROS(J))
      IF(IFL(I+1,J).GT.IBND.AND.IFL(I+1,J).LT.IOB)  U(I,J)=U0
      IF(IFL(I-1,J).GT.IBND.AND.IFL(I-1,J).LT.IOB)  U(I-1,J)=U0
      IF(IFL(I,J-1).GT.IBND.AND.IFL(I,J-1).LT.IOB)  V(I,J-1)=V0
      IF(IFL(I,J+1).GT.IBND.AND.IFL(I,J+1).LT.IOB)  V(I,J)=V0
  128 CONTINUE
      GOTO 105
  130 WRITE(6,17)  KA
      STOP ' ERROR (PA)'
  131 WRITE(6,12) KB
      STOP ' ERROR (PB)'
  132 WRITE(6,32) KS
      STOP ' ERROR (H)'
  140 CONTINUE
      IF(YC.LE.0.D0) STOP 'ERROR YC(IPN=3)'
      KS=IBAR+3
      IF(KS.GT.LPS)GOTO 132
      DO 141 I=1,KS
      H(I)=YC-0.05D0
  141 CONTINUE
  149 WRITE(6,19) NPA,NPB
      WRITE(6,10) IALL
      YH=YC*DY
      IF(XD.GE.0.0)RSQU=1.0/SQRT((RB-RA)/RB*SQRT(GX*GX+GY*GY)*YH)
      IF(XC.LT.0.0) WRITE(6,33)
      IF(XC.EQ.0.0) WRITE(6,35)
      IF(XD.GE.0.0) WRITE(6,42)
      IF(YD.LT.0.0) WRITE(6,43)
      IF(VNU.LT.0.0) WRITE(6,44)
      GOTO 250
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
CCC   ｼﾖｳｶﾞｲﾌﾞﾂ ﾉ ｾﾂﾃｲ
CCC
  150 CONTINUE
      IF(L7.EQ.0)GOTO 160
      NOBST=NOBST+1
      IF(NOBST.GT.LOBST)  STOP 'ERROR (NOBST)'
      L5OB(NOBST)=L5
      L6OB(NOBST)=L6
      L7OB(NOBST)=L7
      L8OB(NOBST)=L8
      IL=L5+2
      IR=L6+1
      JTS=L8+2
      JTE=L7+1
      DO 155  J=JTS,JTE
      DO 155  I=IL,IR
      IOBST=IOBST+1
  155 IFL(I,J)=IOB
CCC
CCC   ﾘﾕｳﾆﾕｳ/ﾘﾕｳｼﾕﾂ ｷﾖｳｶｲ ﾊﾟﾗﾒｰﾀ
CCC
  160 XDIS=0.5D0/AMAX0(NXB,1)
      YDIS=1.0D0/AMAX0(NYB,1)
      NIN=NYB
      DO 161  J=2,JP1
  161 COLS(J)=0.0
      DO 163  J=L1+2,L2+1
      UL(J)=ULL
  163 RL(J)=RLL
      IF(ITYPEL.GE.8)READ(5,11)(RL(J),J=L1+2,L9+1)
      IF(ITYPEL.EQ.9)READ(5,11)(UL(J),J=L1+2,L2+1)
      DO 171  J=L3+2,L4+1
  171 UR(J)=URR
      IF(ITYPER.EQ.9)READ(5,11)(UR(J),J=L3+2,L4+1)
  180 CONTINUE
      IF(ITYPEL.GE.8)  WRITE(6,36)(J,UL(J),J=L1+2,L2+1)
      IF(ITYPEL.EQ.9)  WRITE(6,37)(J,RL(J),J=L1+2,L2+1)
      IF(ITYPER.EQ.9)  WRITE(6,38)(J,UR(J),J=L3+2,L4+1)
      DO 190  J=1,JP2
      IF(J.GE.(L1+2).AND.J.LE.(L2+1))GOTO 184
  182 IF(J.GE.(L3+2).AND.J.LE.(L4+1))GOTO 186
      GOTO 190
  184 U(1,J)=UL(J)
```

```
      R(1,J)=RL(J)
      BCLT(J)=-1.0D0
      GOTO 102
  186 U(IP1,J)=UR(J)
      BCRT(J)=-1.0D0
      IF(URR.NE.0.0.OR.ITYPER.EQ.0) GOTO 190
      ROS(J)=0.0
      BCRT(J)=1.0D0
  190 CONTINUE
      IF(IOBST.EQ.1) IOBST=100
      IF(ITYPE.GT.0) GOTO 69
C   *     *     *     *     *     *     *     *     *     *     *     *     *    * *
CCC   ｹﾞｰﾄ ﾉ ｿｳｻ
CCC
  200 CONTINUE
      DO 202 I=1,NG
      IF(ABS(T-GT(I)).GT.1.0D-4)GOTO 202
      L7=GO(I)*RDY+0.001D0
      IF(L7.LE.0)STOP 'DATA ERROR (GO)
      GOTO 203
  202 CONTINUE
  203 CONTINUE
      IF(L7.GE.JBAR) GOTO KRET
  210 IL=L5+2
      IR=L6+1
      JTS=L7+2
      JTE=JP1
      DO 212 J=JTS,JTE
      DO'212 I=IL,IR
      IGATE=IGATE-1
      IFL(I,J)=IGT
  212 CONTINUE
      IFL(IL,JTS)=ICOR
      IFL(IR,JTS)=ICOR
      GOTO KRET
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
CCC   ﾏｰｶｰ ﾉ ｶｽﾞ
CCC
  250 CONTINUE
      NPA2=NPA*2
      NPB2=NPB*2
      DO 252 J=2,JP1
      DO 252 I=2,IP1
      KF(I,J)=0
  252 CONTINUE
      DO 254 J=2,JP1
      DO 253 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).GE.IOB) KF(I,J)=-11
  253 CONTINUE
  254 CONTINUE
      IF(NPA.EQ.0)GOTO 258
      DO 257 K=1,NPA
      I=PA(2*K-1)+2.0D0
      J=PA(2*K)+2.0D0
      KF(I,J)=KF(I,J)+1
  257 CONTINUE
  258 CONTINUE
      IF(NPB.EQ.0)GOTO 260
      DO 259 K=1,NPB
      I=PB(2*K-1)+2.0D0
      J=PB(2*K)+2.0D0
      KF(I,J)=KF(I,J)+100
  259 CONTINUE
  260 CONTINUE
CCC
C           ﾐﾂﾄﾞ
CCC
      IF(YD.LT.0.0) GOTO 275
      DO 270 J=2,JP1
      DO 270 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.IFUL.AND.IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 270
      IF(KF(I,J).EQ.0) GOTO 268
      R(I,J)=(DFLOAT(KF(I,J)-KF(I,J)/100*100)*RA
     #             +DFLOAT(KF(I,J)/100)*RB)
     $    /DFLOAT(KF(I,J)-KF(I,J)/100*100+KF(I,J)/100)
      GOTO 270
  268 R(I,J)=R(I,J-1)
  270 CONTINUE
  275 CONTINUE
CCC
CCC   SUR --> EMP
CCC
CCC   FUL --> SUR , SUR --> FUL
CCC
  280 CONTINUE
      IF(XC.LT.0.D0) GOTO 299
      DO 290 J=2,JP1
      DO 290 I=2,IP1
      IF(XC.GT.0.0) GOTO 289
      IF(IFL(I,J).GE.IOB) GOTO 290
      JH=(H(I)+H(I+1))/2.0D0
      IF(J-2-JH) 288,286,284
  284 IFL(I,J)=IEMP
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)U(I,J)=0.0
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)U(I-1,J)=0.0
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)V(I,J)=0.0
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)V(I,J-1)=0.0
      GOTO 290
  286 IFL(I,J)=ISUR
      GOTO 290
  288 IFL(I,J)=IFUL
      GOTO 290
  289 IF(IFL(I,J).EQ.ISUR.AND.KF(I,J).EQ.0) GOTO 284
  290 CONTINUE
      IF(XC.EQ.0.0) GOTO 293
      DO 292 J=2,JP1
      DO 292 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).GE.IEMP) GOTO 292
      IF(IFL(I,J).NE.IFUL) GOTO 291
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP.OR.IFL(I-1,J).EQ.IEMP.OR.IFL(I,J+1).EQ.IEMP
     * .OR.IFL(I,J-1).EQ.IEMP) IFL(I,J)=ISUR
      GOTO 292
  291 IF(IFL(I,J).GE.IOB.OR.IFL(I+1,J).EQ.IEMP.OR.IFL(I-1,J).EQ.IEMP
     * .OR.IFL(I,J+1).EQ.IEMP.OR.IFL(I,J-1).EQ.IEMP) GOTO 292
      IFL(I,J)=IFUL
  292 CONTINUE
  293 CONTINUE
      IF(ITYPE.EQ.0.OR.XC.NE.0.0) GOTO 299
      DO 295 J=2,JP1
      DO 295 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR) GOTO 295
      IF(IFL(I-1,J).GE.IOB) H(I-1)=H(I+1)
      IF(IFL(I+1,J).GE.IOB) H(I+2)=H(I)
  295 CONTINUE
  299 CONTINUE
CCC
      CALL BNDARY(IP2,JP2,3)
      CALL BNDARY(IP2,JP2,1)
      CALL BNDARY(IP2,JP2,2)
      CALL BNDARY(IP2,JP2,4)
      IF(YD.LT.0.0) CALL DENST(IP2,JP2)
      IF(VNU.GE.0.0) GOTO 300
```

資料 3 ―⑨

```
      CALL VISCO(IP2,JP2)
C  *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *  *
CCC   ﾋﾖｳﾒﾝ ｱﾂﾘﾖｸ ﾉ ｾﾂﾃｲ
CCC
  300 CONTINUE
      DO 350 J=2,JP1
      DO 350 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 340
      N=0
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)N=N+1
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)N=N+2
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)N=N+4
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP) N=N+8
      IF(XC.GT.0.0) GOTO(341,342,343,341,335,344,335,342,345,335,
     * 335,346,335,335,335),N
      RSQ=1.0D0/SQRT(DX**2+((H(I+1)-H(I))*DY)**2)
      ACOS=DX*RSQ
      ASIN=(H(I+1)-H(I))*DY*RSQ
      GOTO (305,315,310,325,335,320,335),N
  305 PPP(I,J)=2.0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))
     2     -0.5*ACOS*(V(I,J-1)-V(I-1,J-1)+V(I,J)-V(I-1,J)))
     3 +ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I,J-1))
     4     -0.5*ASIN*(U(I,J+1)-U(I,J-1))))
      GOTO 350
  310 PPP(I,J)=2.0D0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))-ACOS*(V(I,J)-V(I-1,J)))+
     2 ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I,J-1))-ASIN*(U(I,J)-U(I,J-1))))
      GOTO 350
  315 PPP(I,J)=2.0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))
     2     -0.5*ACOS*(V(I+1,J)-V(I-1,J)))
     3 +ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I-1,J))
     4     -0.5*ASIN*(U(I-1,J)+U(I,J)-U(I-1,J-1)-U(I,J-1))))
      GOTO 350
  320 PPP(I,J)=2.0D0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))-ACOS*(V(I+1,J)-V(I,J)))+
     2  ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I,J-1))-ASIN*(U(I-1,J)-U(I-1,J-1))))
      GOTO 350
  325 PPP(I,J)=2.0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))
     2     -0.5*ACOS*(V(I+1,J)-V(I,J)+V(I+1,J-1)-V(I,J-1)))
     3 +ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I-1,J))
     4     -0.5*ASIN*(U(I-1,J+1)-U(I-1,J-1))))
      GOTO 350
  335 PPP(I,J)=0.0
      GOTO 350
  341 ASIN=1.0
      ACOS=0.0
      GOTO 310
  342 ASIN=0.0
      ACOS=1.0
      GOTO 310
  343 PPP(I,J)=0.5*R(I,J)*VIS(I,J)*(RDX*(V(I,J)+V(I,J-1)-V(I-1,J)
     * -V(I-1,J-1))+RDY*(U(I-1,J)+U(I,J)-U(I-1,J-1)-U(I,J-1)))
      GOTO 350
  344 PPP(I,J)=-0.5*R(I,J)*VIS(I,J)*(RDX*(V(I+1,J)+V(I+1,J-1)-V(I,J)
     * -V(I,J-1))+RDY*(U(I-1,J)+U(I,J)-U(I-1,J-1)-U(I,J-1)))
      GOTO 350
  345 PPP(I,J)=-0.5*R(I,J)*VIS(I,J)*(RDX*(V(I,J)+V(I,J-1)-V(I-1,J)
     * -V(I-1,J-1))+RDY*(U(I,J+1)+U(I-1,J+1)-U(I,J)-U(I-1,J)))
      GOTO 350
  346 PPP(I,J)=0.5*R(I,J)*VIS(I,J)*(RDX*(V(I+1,J)+V(I+1,J-1)-V(I,J)
     * -V(I,J-1))+RDY*(U(I,J+1)+U(I-1,J+1)-U(I,J)-U(I-1,J)))
      GOTO 350
  340 IF(ICYCLE.NE.0)GOTO 350
      IF(ITYPE.NE.0.AND.URR.EQ.0.0) GOTO 350
      IF(IFL(I,J).NE.IFUL) GOTO 350
      PPP(I,J)=(-GY*DY*(0.5*(H(I+1)+H(I))-J+1.5)+GX*DX*(I-1.5))*R(I,J)
  350 CONTINUE
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C  SURFACE PRESSURE INTERPOLATION
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      IF(XC.NE.0.0) GOTO 400
      DO 390 J=2,JP1
      DO 390 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 390
      NS=I-1
       HS(NS)=1./(0.5D0*(H(I)+H(I+1))-DFLOAT(J)+2.5D0)
      IF(HS(NS).LE.2.0D0/3.0D0)HS(NS)=2.0D0/3.0D0
      PPP(I,J)=HS(NS)*(PPP(I,J)-PPP(I,J-1))+PPP(I,J-1)
  390 CONTINUE
C  *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *  *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
CCC   ｼﾕﾂﾘﾖｸ ｼﾖﾘ
CCC
  400 CONTINUE
      IF(ICYCLE.EQ.0.AND.IPN.EQ.3) GOTO 410
      IF(ABS(TWPRT-T).GT.1.0D-4)GOTO 420
CCC
C    PRINT OUT
CCC
      NUMPR=NUMPR+1
      TWPRT=TWPRT+TPRT
  410 CONTINUE
      LINE=0
      DO 415 JJ=1,JP2
      DO 414 I=1,IP2
      LINE=LINE+1
      IF(MOD(LINE,60).NE.1) GOTO 412
      WRITE(6,1)
      WRITE(6,2) LNAME
      WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE
      WRITE(6,22)
  412 CONTINUE
      J=JP2+1-JJ
      IJ=IFL(I,J)
      IF(IJ.EQ.0) IJ=8
      IF(I.EQ.1.OR.I.EQ.IP2.OR.J.EQ.1.OR.J.EQ.JP2) GOTO 413
       DIJ=RDX*(U(I,J)-U(I-1,J))+RDY*(V(I,J)-V(I,J-1))
      UIJ=0.5D0*(U(I,J)+U(I-1,J))
      VIJ=0.5D0*(V(I,J)+V(I,J-1))
      VORIJ=RDX*(V(I+1,J)-V(I,J))-RDY*(U(I,J+1)-U(I,J))
      WRITE(6,23) I,J,FL(IJ),U(I,J),V(I,J),PPP(I,J),DIJ,
     # UIJ,VIJ,R(I,J),VIS(I,J),VORIJ
      GOTO 414
  413 CONTINUE
      WRITE(6,45) I,J,FL(IJ),U(I,J),V(I,J),PPP(I,J),R(I,J),VIS(I,J)
  414 CONTINUE
  415 CONTINUE
      WRITE(6,22)
  420 IF(ICYCLE.EQ.0) GOTO 421
      IF(ABS(TWT-T).GT.1.0D-4) GOTO 450
CCC
C    TAPE  DUMP
CCC
      NUMTD=NUMTD+1
      TWT=TWT+TT
  421 CONTINUE
      WRITE(6,24) NUMTD,T,ICYCLE
      IF(IW.EQ.19) REWIND IW
      WRITE(IW)
```

資料 3 —⑩

```
     1 NAME,ICALL,IFL,KF,RCALL,U,V,UTIL,VTIL,PPP,R,VIS,H,RA,RB,
     2 HS,RSQU,(PA(I),I=1,NPA2),(PB(I),I=1,NPB2)
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
  450 CONTINUE
      IXP=IXP+1
      IF(IXP.EQ.IXPR) IXP=1
      IF(IXP.NE.1)GOTO 459
      IF(ICYCLE.EQ.0.AND.IPN.GE.7) GOTO 459
      GOTO (453,453,454,458),IPR
CCC
  453 CONTINUE
      IF(XC.NE.0.0) GOTO 454
      WRITE(6,1)
      WRITE(6,2) LNAME
      WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE
      WRITE(6,34) (H(I),I=1,IBAR+3)
CCC
  454 CONTINUE
      WRITE(6,1)
      WRITE(6,2) LNAME
      WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE
      DO 457 KK=1,50
      IS=30*(KK-1)+2
      IE=MINO(IP1,IS+29)
      DO 456 JJ=2,JP1
      J=JP2+1-JJ
      WRITE(6,27) J,(KF(I,J),I=IS,IE)
      WRITE(6,41) (FL(IFL(I,J)),I=IS,IE)
  456 CONTINUE
      WRITE(6,28)
      IF(IE.EQ.IP1)GOTO 458
  457 CONTINUE
CCC
  458 CONTINUE
      CALL  LPLT2(LPX,LPY,NPA,PA,NPB,PB)
  459 CONTINUE
      WRITE(6,2) LNAME
      WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE
      IF(ITYPE.NE.0)WRITE(6,19)NPA,NPB
      IF(XD.GE.0.0) CALL UF(PB,NPB2,1,IP2,JP2,T,XD,RSQU,YH,DX)
      CALL PTIME(CTL)
      CTIME=CTL-CT1
      CTSL=CTL-CTS
      WRITE(6,20) CTSL*3600.0,CTIME*3600.0
      IF(TWFIN.LE.T) GOTO 950
      CTS=CTL
      IF(CTIME.GE.CTMAX) STOP 'CTIME LIMIT'
      ICYCLE=ICYCLE+1
      T=T0+DT*DFLOAT(ICYCLE)
      GOTO 490
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    * *
CCC
C   TAPE RESTART
C
  460 CONTINUE
      WRITE(6,25) IP2,JP2
      READ(5,29) TAPE,TWFIN,IPR,IW,IRF,TDT,TPT,CTMAX
      IF(CTMAX.EQ.0.0) CTMAX=0.25
      CTMAX=CTMAX*0.95
      IF(IPR.LT.1.OR.IPR.GT.4) IPR=3
      WRITE(6,40) TAPE,TWFIN,IPR,IW,IRF
      IF(TAPE.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TAPE)'
      IF(TWFIN.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWFIN)'
      REWIND IRF
  465 READ(IRF,ERR=990)
     1NNAME,ICALL,IFL,KF,RCALL,U,V,UTIL,VTIL,PPP,R,VIS,H,RA,RB,
     2 HS,RSQU,(PA(I),I=1,NPA2),(PB(I),I=1,NPB2)
      IF(T.GE.TAPE)GOTO 466
      IF(ABS(T-TAPE).GT.1.0D-4)GOTO 465
  466 CONTINUE
      NPA=NPA2/2
      NPB=NPB2/2
      IF(TDT.GT.0.0)  TT=TDT
      IF(TPT.GT.0.0)  TPRT=TPT
      WRITE(6,26) TDT,TPT
      WRITE(6,30) NUMTD
      WRITE(6,2) NNAME
      WRITE(6,39) IDATE
      WRITE(6,5)IBAR,JBAR,DX,DY,DT,BO
      WRITE(6,6) BCB,BCL,BCT,BCR,VNU,EPSD,GX,GY
      WRITE(6,7) T,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW
      WRITE(6,9) ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,
     # L10,L11,L12,L13,NXB,NYB,ULL,URR,RLL
      IF(ITYPE.GE.0)GOTO 467
      IR=L5+1
      IL=L6+1
      JTS=L7+2
      JTE=JP1
      WRITE(6,12) NG
      WRITE(6,13) (GT(I),GO(I),I=1,NG)
  467 WRITE(6,19) NPA,NPB
      IXP=IXP+1
      IF(IXP.EQ.IXPR) IXP=1
      CALL DATIM(IDATE,CTM)
      WRITE(6,39) IDATE
      GOTO 459
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
  490 CONTINUE
CCC
CCC          PREPARE FOR UTIL / VTIL CALCULATION
      DO 500 J=2,JP1
        DO 500 I=2,IP1
          UTIL(I,J)=U(I,J)
  500     VTIL(I,J)=V(I,J)
CCC
C     UTIL,VTIL CALCULATION
CCC
      DO 545 J=2,JP1
      DO 545 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).GE.IEMP) GOTO 545
      IF(I.EQ.IP1.OR.IFL(I+1,J).GE.IEMP) GOTO 529
      NCOR=0
      IF(ITYPE.EQ.0) GOTO 509
      IF(IFL(I,J-1).NE.ICOR.OR.IFL(I+1,J-1).GE.IOB) GOTO 501
      NCOR=1
      GOTO 509
  501 IF(IFL(I+1,J-1).NE.ICOR.OR.IFL(I,J-1).GE.IOB
     * .OR.IFL(I+1,J).GE.IOB) GOTO 502
      NCOR=2
      GOTO 509
  502 IF(IFL(I+1,J).NE.ICOR.OR.IFL(I+1,J+1).GE.IOB) GOTO 503
      NCOR=3
      GOTO 509
  503 IF(IFL(I+1,J+1).NE.ICOR.OR.IFL(I+1,J).GE.IOB
     * .OR.IFL(I,J+1).GE.IOB) GOTO 504
      NCOR=4
      GOTO 509
  504 IF(IFL(I,J+1).NE.ICOR.OR.IFL(I+1,J+1).GE.IOB) GOTO 505
      NCOR=5
      GOTO 509
  505 IF(IFL(I-1,J+1).NE.ICOR.OR.IFL(I,J+1).GE.IOB
     * .OR.IFL(I-1,J).GE.IOB) GOTO 506
      NCOR=6
      GOTO 509
  506 IF(IFL(I-1,J).NE.ICOR.OR.IFL(I-1,J+1).GE.IOB) GOTO 509
      NCOR=7
  509 CONTINUE
      IF(I.EQ.IP1.OR.IFL(I+1,J).GE.IEMP) GOTO 521
      VBL=V(I,J-1)
      VBR=V(I+1,J-1)
       VTL=V(I,J)
      VTR=V(I+1,J)
      UB=U(I,J-1)
      UT=U(I,J+1)
      GOTO (516,510,511,516,513,514,516,516),NCOR+1
  510 VBL=VBR*BCB
      GOTO 512
  511 VBR=VBL*BCB
  512 UB=U(I,J)*BCB
      GOTO 516
  513 VTR=VTL*BCB
      GOTO 515
  514 VTL=VTR*BCB
  515 UT=U(I,J)*BCB
  516 CONTINUE
      RBL=R(I,J-1)
      RBR=R(I+1,J-1)
      RTL=R(I,J+1)
      RTR=R(I+1,J+1)
      VISBL=VIS(I,J-1)
      VISBR=VIS(I+1,J-1)
      VISTL=VIS(I,J+1)
      VISTR=VIS(I+1,J+1)
      IF(ITYPE.EQ.0) GOTO 523
      IF(IFL(I,J-1).LT.IOB) GOTO 520
      RBL=R(I,J)
      VISBL=VIS(I,J)
      GOTO 523
  520 IF(IFL(I+1,J-1).LT.IOB) GOTO 521
      RBR=R(I+1,J)
      VISBR=VIS(I+1,J)
      GOTO 523
  521 IF(IFL(I,J+1).LT.IOB) GOTO 522
      RTL=R(I,J)
      VISTL=VIS(I,J)
      GOTO 523
  522 IF(IFL(I+1,J+1).LT.IOB) GOTO 523
      RTR=R(I+1,J)
      VISTR=VIS(I+1,J)
  523 CONTINUE
      AV=VBL+VBR
      IF(AV.LT.0.0) GOTO 524
      RUVBR=0.25*(RBL+RBR)*UB*AV
      GOTO 525
  524 RUVBR=0.25*(R(I,J)+R(I+1,J))*U(I,J)*AV
  525 AV=VTL+VTR
      IF(AV.LT.0.0) GOTO 526
      RUVTR=0.25*(R(I,J)+R(I+1,J))*U(I,J)*AV
      GOTO 527
  526 RUVTR=0.25*(RTL+RTR)*UT*AV
  527 CONTINUE
      ZIP=U(I,J)*(R(I,J)*U(I-1,J)-R(I+1,J)*U(I+1,J))
      ROH=0.5D0*(R(I,J)+R(I+1,J))
      UTIL(I,J)=U(I,J)+DT*GX+DT*(RDX*(ZIP+PPP(I,J)-PPP(I+1,J))/ROH
     1 +RDY*(RUVBR-RUVTR)/ROH+2.0D0*RDX2*(VIS(I+1,J)*(U(I+1,J)-U(I,J))
     2     -VIS(I,J)*(U(I,J)-U(I-1,J)))
     3 +0.25*RDY*(VIS(I,J)+VIS(I+1,J)+VISTL+VISTR)
     4          *(RDY*(UT-U(I,J))+RDX*(VTR-VTL))
     5 -0.25*RDY*(VIS(I,J)+VIS(I+1,J)+VISBL+VISBR)
     6          *(RDY*(U(I,J)-UB)+RDX*(VBR-VBL)))
  529 CONTINUE
      IF(J.EQ.JP1.OR.IFL(I,J+1).GE.IEMP) GOTO 545
      UBL=U(I-1,J)
      UBR=U(I,J)
      UTL=U(I-1,J+1)
      UTR=U(I,J+1)
      VL=V(I-1,J)
      VR=V(I+1,J)
      GOTO (536,536,536,530,531,536,533,534),NCOR+1
  530 UBR=UTR*BCB
      GOTO 532
  531 UTR=UBR*BCB
  532 VR=V(I,J)*BCB
      GOTO 536
  533 UTL=UBL*BCB
      GOTO 535
  534 UBL=UTL*BCB
  535 VL=V(I,J)*BCB
  536 CONTINUE
      RBL=R(I-1,J)
      RBR=R(I+1,J)
      RTL=R(I-1,J+1)
      RTR=R(I+1,J+1)
      VISBL=VIS(I-1,J)
      VISBR=VIS(I+1,J)
      VISTL=VIS(I-1,J+1)
      VISTR=VIS(I+1,J+1)
      IF(ITYPE.EQ.0) GOTO 540
      IF(IFL(I-1,J).LT.IOB) GOTO 537
      RBL=R(I,J)
      VISBL=VIS(I,J)
      GOTO 540
  537 IF(IFL(I+1,J).LT.IOB) GOTO 538
      RBR=R(I,J)
      VISBR=VIS(I,J)
      GOTO 540
  538 IF(IFL(I-1,J+1).LT.IOB) GOTO 539
      RTL=R(I,J+1)
      VISTL=VIS(I,J+1)
      GOTO 540
  539 IF(IFL(I+1,J+1).LT.IOB) GOTO 540
      RTR=R(I,J+1)
      VISTR=VIS(I,J+1)
  540 CONTINUE
      AV=UBL+UTL
      IF(AV.LT.0.0) GOTO 541
      RUVTL=0.25*(RBL+RTL)*VL*AV
      GOTO 542
  541 RUVTL=0.25*(R(I,J)+R(I,J+1))*V(I,J)*AV
  542 AV=UBR+UTR
      IF(AV.LT.0.0) GOTO 543
      RUVTR=0.25*(R(I,J)+R(I,J+1))*V(I,J)*AV
      GOTO 544
  543 RUVTR=0.25*(RBR+RTR)*VR*AV
  544 CONTINUE
      ZIP=V(I,J)*(R(I,J)*V(I,J-1)-R(I,J+1)*V(I,J+1))
      ROH=0.5D0*(R(I,J)+R(I,J+1))
      VTIL(I,J)=V(I,J)+DT*GY+DT*(RDY*(ZIP+PPP(I,J)-PPP(I,J+1))/ROH
     1 +RDX*(RUVTL-RUVTR)/ROH+2.0D0*RDY2*(VIS(I,J+1)*(V(I,J+1)-V(I,J))
     2     -VIS(I,J)*(V(I,J)-V(I,J-1)))
     3 +0.25*RDX*((VIS(I,J)+VIS(I,J+1)+VISBR+VISTR)
     4              *(RDY*(UTR-UBR)+RDX*(VR-V(I,J)))
     5           -(VIS(I,J)+VIS(I,J+1)+VISBL+VISTL)
     6              *(RDY*(UTL-UBL)+RDX*(V(I,J)-VL)))
  545 CONTINUE
      DO 550 J=2,JP1
      DO 550 I=2,IP1
          U(I,J)=UTIL(I,J)
          V(I,J)=VTIL(I,J)
  550 CONTINUE
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
CCC
C  P,U,V  CALCULATION (ITERATION)
CCC
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      IND=1
      ITERD=0
  555 CONTINUE
C   BOUNDARY CONDITION (PERPENDICULAR TO THE BOUNDARY)
      DO 556 J=2,JP1
      U(1,J)=UL(J)
      U(IP1,J)=UR(J)*ROS(J)+U(IP1-1,J)*(1.0D0-ROS(J))
  556 CONTINUE
      DO 557 I=2,IP1
      V(I,1)=0.
      V(I,JP1)=0.
  557 CONTINUE
      CALL BNDARY(IP2,JP2,2)
CC
      IF(IND.EQ.0) GOTO 580
      IND=0
      ITERD=ITERD+1
       DD=0.0
      DO 560 J=2,JP1
      DO 560 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.IFUL) GOTO 560
      DIJ=RDX*(U(I,J)-U(I-1,J))+RDY*(V(I,J)-V(I,J-1))
      UIJ=0.5*(U(I,J)+U(I-1,J))
      VIJ=0.5*(V(I,J)+V(I,J-1))
      SQUV=SQRT(UIJ*UIJ+VIJ*VIJ)
      DP=BETA*DIJ
      IF(SQUV.LE.1.0) SQUV=1.0
      DIJ=DIJ/SQUV
      IF(ABS(DIJ).LE.DD) GOTO 559
      DD=ABS(DIJ)
      II=I
      JJ=J
  559 CONTINUE
      PPP(I,J)=PPP(I,J)-DP
      U(I,J)=U(I,J)-DTODX*DP
      U(I-1,J)=U(I-1,J)+DTODX*DP
      V(I,J)=V(I,J)-DTODY*DP
      V(I,J-1)=V(I,J-1)+DTODY*DP
  560 CONTINUE
      IF(DD.GT.EPSD) IND=1
      IF(IPN.LE.4.OR.IPN.EQ.7) WRITE(6,31) T,ICYCLE,ITERD,DD,II,JJ
      IF(ITERD.GT.5000) STOP 'SLOW CONVERGENCE (ITERD>5000)'
      GOTO 555
  580 CONTINUE
      WRITE(6,31) T,ICYCLE,ITERD,DD,II,JJ
  600 CONTINUE
      CALL BNDARY(IP2,JP2,3)
      CALL BNDARY(IP2,JP2,1)
CCC
C700  MOVE & PACK MARKER PARTICLES
CCC
```

資料3—⑬

```
  700 CONTINUE
      IF(NPA.NE.0) CALL MARKER(IP2,JP2,NPA,KNA,PA)
      IF(ITYPEL.EQ.0)GOTO 800
      IF(L9.EQ.L2) GOTO 800
      DO 739 K=L9+2,L2+1
  715 X=UL(K)*RDX*(T+DT)-XDIS*(2.0D0*COLS(K)+1.0D0)
      IF(X.LT.0.0)GOTO 739
  720 COLS(K)=COLS(K)+1.0D0
      Y=0.5*YDIS+DFLOAT(K-2)
      NPNA=NPA+NIN
  725 PA(KNA)=X
      PA(KNA+1)=Y
      KNA=KNA+2
      NPA=NPA+1
      I=X+2.0D0
      J=Y+2.0D0
      Y=Y+YDIS
      IF(IFL(I,J).NE.IEMP)GOTO 730
      IFL(I,J)=ISUR
      U(1,J)=UL(J)
      R(1,J)=RL(J)
  730 IF(KNA.GT.LPA)GOTO 130
      IF(NPA.LT.NPNA)GOTO 725
      GOTO 715
  739 CONTINUE
  740 CONTINUE
  800 CONTINUE
      IF(NPB.NE.0) CALL MARKER(IP2,JP2,NPB,KNB,PB)
      IF(ITYPEL.LE.2) GOTO 840
      DO 839 K=L1+2,L9+1
  815 X=UL(K)*RDX*(T+DT)-XDIS*(2.0D0*COLS(K)+1.0D0)
      IF(X.LT.0.0)GOTO 839
  820 COLS(K)=COLS(K)+1.0D0
      Y=0.5*YDIS+DFLOAT(K-2)
      NPNB=NPB+NIN
  825 PB(KNB)=X
      PB(KNB+1)=Y
      KNB=KNB+2
      NPB=NPB+1
      I=X+2.0D0
      J=Y+2.0D0
      Y=Y+YDIS
      IF(IFL(I,J).NE.IEMP)GOTO 830
      IFL(I,J)=ISUR
      U(1,J)=UL(J)
      R(1,J)=RL(J)
  830 IF(KNB.GT.LPB)GOTO 131
      IF(NPB.LT.NPNB)GOTO 825
      GOTO 815
  839 CONTINUE
  840 CONTINUE
      IF(XC.NE.0.0) GOTO 900
      DO 850 I=2,IBAR+2
      JR=H(I)+1.5D0
      HPY=JR-0.5-H(I)
      HMY=1.0-HPY
      UK=0.5D0*(HMY*U(I-1,JR+1)+HPY*U(I-1,JR))
      JD=H(I)+2.0D0
      HPY=JD-1.0-H(I)
      HMY=1.0-HPY
      VK=0.25D0*(HMY*(V(I-1,JD)+V(I,JD))
     #  +HPY*(V(I-1,JD-1)+V(I,JD-1)))
      HD(I)=H(I)+(VK*DT-UK*DTODX*0.5D0*(H(I+1)-H(I-1))*DY)*RDY
  850 CONTINUE
      DO 860 I=2,IBAR+2
  860 H(I)=HD(I)
```

```
      H(1)=H(3)
      H(IBAR+3)=H(IBAR+1)
  900 IF(ITYPE.GE.0)GOTO 250
      DO 910 J=JTS,JTE
      DO 910 I=IL,IR
         IFL(I,J)=IEMP
  910 CONTINUE
      ASSIGN 250 TO KRET
      GOTO 200
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
  950 CONTINUE
      ENDFILE IN
      RETURN
  990 STOP ' READ ERROR (IRF)'
      END
      SUBROUTINE UF(XP,MP2,IP,IP2,JP2,T,XS,RSQU,H,DX)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*4 XP
      PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
      PARAMETER LPA=100000,LPB=100000
      PARAMETER LXP=LPA,LPS=MI+3,MALL=48+7*MJ+2*MG
      DIMENSION XP(LXP)
      COMMON/RC/A(MALL),
     5 U(MI,MJ),V(MI,MJ),UTIL(MI,MJ),VTIL(MI,MJ),PPP(MI,MJ),R(MI,MJ),
     6 VIS(MI,MJ),HH(LPS),RA,RB
      IF(H.LE.0.0.OR.RSQU.EQ.0.0) RETURN
      KK=0
      GOTO (1000,2000),IP
 1000 CONTINUE
      C=1.0
      XX=0.0
      GOTO 3000
 2000 CONTINUE
      C=-1.0
      XX=10000.0
 3000 CONTINUE
       DO 150 K = 1,MP2,2
        IF(IFIX(XP(K+1)))150,105,150
  105  IF(C*(XX-XP(K)))110,150,150
  110 KK=(K+1)/2
      XX=XP(K)
  150 CONTINUE
      IF(KK.EQ.0)GOTO 200
      X0=XP(2*KK-1)
      Y0=XP(2*KK)
      XX=X0+1.0
      YY=Y0+1.0
      II=XX+1.0001
      JJ=YY+1.0001
      UU=(XX-FLOAT(II-1))*U(II,JJ)+(FLOAT(II)-XX)*U(II-1,JJ)
      UU0=UU*RSQU
      VV=(YY-FLOAT(JJ-1))*V(II,JJ)+(FLOAT(JJ)-YY)*V(II,JJ-1)
      X0=X0-XS
      XX0=X0*DX/H
      TT0=T/(H*RSQU)
      WRITE(6,100) T,UU,VV,X0,Y0,II,JJ,KK,TT0,UU0,XX0
  100 FORMAT('  T=',F8.3,'  UU=',F8.3,'  VV=',F8.3,
     # '  X0=',F8.3,'  Y0=',F8.3,'  II=',I3,'  JJ=',I3,
     # '  KK=',I4,'  TT0=',F8.3,'  UU0=',F8.4,'  XX0=',F8.3)
      IF(T.EQ.0.D0) XS=X0
      RETURN
  200 WRITE(6,101) T
  101 FORMAT('   T=',1PE12.4,'   KK= 0')
      RETURN
      END
      SUBROUTINE VISCO(IP2,JP2)
C     SMAGORINSKY-DEARDORFF MODEL (SUBGRID SCALE EDDY COEFFICIENT)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
      PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
      COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
     - ICOR,IGT,
     1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
     2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
     + L80B(LB),
     3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
     4 IFL(MI,MJ),KF(MI,MJ)
      COMMON/RC/TAPE,B0,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
     1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
     2 YC,YD,YDIS,YTE,U0,V0,R0,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
     3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
     4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,YH,
     5 U(MI,MJ),V(MI,MJ),UTIL(MI,MJ),VTIL(MI,MJ),PPP(MI,MJ),R(MI,MJ),
     6 VIS(MI,MJ),H(LPS),RA,RB
      VISM=-VNU
      IF(VNU.LE.-99.0) VISM=0.0
      C=0.21*0.21*DX*DY
      DO 100 J=2,JP1
      DO 100 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.IFUL)GOTO 100
      VIS(I,J)=C*SQRT(2.0*RDX2*(U(I,J)-U(I-1,J))**2
     1              +2.0*RDY2*(V(I,J)-V(I,J-1))**2
     2  +0.25*(((V(I+1,J)-V(I,J))*RDX+(U(I,J+1)-U(I,J))*RDY)**2
     3         +((V(I,J)-V(I-1,J))*RDX+(U(I-1,J+1)-U(I-1,J))*RDY)**2
     4         +((V(I,J-1)-V(I-1,J-1))*RDX+(U(I-1,J)-U(I-1,J-1))*RDY)**2
     5         +((V(I+1,J-1)-V(I,J-1))*RDX+(U(I,J)-U(I,J-1))*RDY)**2))
  100 CONTINUE
      DO 200 J=2,JP1
      DO 200 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR) GOTO 200
      N=0
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP) N=N+1
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP) N=N+2
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP) N=N+4
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP) N=N+8
      GOTO(105,110,115,120,125,130,135,140,145,150,105,160,140,120,200)
     * ,N
  105 VIS(I,J)=VIS(I-1,J)
      GOTO 200
  110 VIS(I,J)=VIS(I,J-1)
      GOTO 200
  115 VIS(I,J)=VIS(I-1,J-1)
      GOTO 200
  120 VIS(I,J)=VIS(I+1,J)
      GOTO 200
  125 VIS(I,J)=(VIS(I,J+1)+VIS(I,J-1))/2
      GOTO 200
  130 VIS(I,J)=VIS(I+1,J-1)
      GOTO 200
  135 VIS(I,J)=VIS(I,J-1)
      GOTO 200
  140 VIS(I,J)=VIS(I,J+1)
      GOTO 200
  145 VIS(I,J)=VIS(I-1,J+1)
      GOTO 200
  150 VIS(I,J)=(VIS(I+1,J)+VIS(I-1,J))/2
      GOTO 200
  160 VIS(I,J)=VIS(I+1,J+1)
  200 CONTINUE
      DO 210 J=2,JP1
      DO 210 I=2,IP1
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR) GOTO 210
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP) VIS(I,J-1)=VIS(I,J)
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP) VIS(I-1,J)=VIS(I,J)
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP) VIS(I+1,J)=VIS(I,J)
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP) VIS(I,J+1)=VIS(I,J)
  210 CONTINUE
      IF(VISM.EQ.0.0) GOTO 259
      DO  250  J=2,JP1
      DO  250  I=2,IP1
      VIS(I,J)=VIS(I,J)+VISM
  250 CONTINUE
  259 CONTINUE
      CALL BNDARY(IP2,JP2,5)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE DENST(IP2,JP2)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      PARAMETER MI=242,MJ=46,LB=10,MG=50
      PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
      CHARACTER LNAME*40
      COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,I06,
     - ICOR,IGT,
     1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
     2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
     + L80B(LB),
     3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME,
     4 IFL(MI,MJ),KF(MI,MJ)
      COMMON/RC/TAPE,B0,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
     1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
     2 YC,YD,YDIS,YTE,U0,V0,R0,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
     3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
     4 T0,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,YH,
     5 U(MI,MJ),V(MI,MJ),UTIL(MI,MJ),VTIL(MI,MJ),PPP(MI,MJ),R(MI,MJ),
     6 VIS(MI,MJ),H(LPS),RA,RB
      DIMENSION WK(MI,MJ)
C
      DO 5 J=1,JP2
      DO 5 I=1,IP2
      R(I,J)=R(I,J)-1.0
    5 CONTINUE
      DO 100 J=1,JP2
      DO 100 I=1,IP2
      IF(IFL(I,J).NE.IFUL.AND.IFL(I,J).NE.ISUR) GOTO 90
      IF(U(I,J)) 10,15,15
   10 RUP=R(I+1,J)*U(I,J)
      GOTO 20
   15 RUP=R(I,J)*U(I,J)
   20 CONTINUE
      IF(U(I-1,J)) 25,30,30
   25 RUM=R(I,J)*U(I-1,J)
      GOTO 35
   30 RUM=R(I-1,J)*U(I-1,J)
   35 CONTINUE
      IF(V(I,J)) 40,45,45
   40 RVP=R(I,J+1)*V(I,J)
      GOTO 50
   45 RVP=R(I,J)*V(I,J)
   50 CONTINUE
      IF(V(I,J-1)) 55,60,60
   55 RVM=R(I,J)*V(I,J-1)
      GOTO 65
   60 RVM=R(I,J-1)*V(I,J-1)
   65 CONTINUE
      WK(I,J)=R(I,J)-DTODX*(RUP-RUM)-DTODY*(RVP-RVM)
      GOTO 100
   90 WK(I,J)=R(I,J)
  100 CONTINUE
C
      DO 200 J=1,JP2
      DO 200 I=1,IP2
  200 R(I,J)=WK(I,J)+1.0
C
      CALL BNDARY(IP2,JP2,4)
      RETURN
      END
```

資料 4　$\overline{K}$の実験値一覧

Basic data 4. Experimental results of the average velocity $\overline{K}$

Run	$\overline{K}$	Re	d/H_0	$\overline{K}_d$	Re_d
101-1	0.43	3.26×10^{3}	0.50	0.61	1.15×10^{3}
104-1	0.40	3.23×10^{3}	0.50	0.57	1.14×10^{3}
105-1	0.43	9.13×10^{3}	0.50	0.61	3.23×10^{3}
106-3	0.43	2.63×10^{4}	0.40	0.68	6.64×10^{3}
107-3	0.43	3.36×10^{3}	0.60	0.56	1.56×10^{3}
108-2	0.46	9.60×10^{3}	0.50	0.61	3.39×10^{3}
109-1	0.44	2.74×10^{4}	0.41	0.69	7.07×10^{3}
109-2	0.47	2.71×10^{4}	0.48	0.68	8.89×10^{3}
111-1	0.44	9.70×10^{3}	0.50	0.62	3.43×10^{3}
111-2	0.43	9.65×10^{3}	0.45	0.64	2.91×10^{3}
112-1	0.44	2.76×10^{4}	0.41	0.69	7.11×10^{3}
112-2	0.43	2.73×10^{4}	0.40	0.68	6.90×10^{3}
201-1	0.44	4.80×10^{3}	0.48	0.64	1.60×10^{3}
201-2	0.44	4.77×10^{3}	0.50	0.62	1.69×10^{3}
201-3	0.44	4.76×10^{3}	0.44	0.66	1.39×10^{3}
202-1	0.44	1.36×10^{4}	0.45	0.66	4.10×10^{3}
202-2	0.44	1.36×10^{4}	0.50	0.62	4.80×10^{3}
204-1	0.43	4.77×10^{3}	0.48	0.62	1.59×10^{3}
204-2	0.43	4.76×10^{3}	0.48	0.62	1.39×10^{3}
204-3	0.42	4.80×10^{3}	0.46	0.62	1.50×10^{3}

資料 4（つづき）

Run	$\overline{K}$	Re	d/H_0	$\overline{K}_d$	Re_d
205-1	0.46	1.36×10^{4}	0.49	0.66	4.68×10^{3}
205-2	0.44	1.35×10^{4}	0.50	0.62	4.77×10^{3}
206-1	0.46	3.86×10^{4}	0.48	0.66	1.26×10^{4}
206-2	0.47	3.82×10^{4}	0.50	0.66	1.35×10^{4}
206-3	0.46	3.77×10^{4}	0.40	0.72	9.35×10^{3}
207-1	0.43	4.70×10^{3}	0.50	0.61	1.66×10^{3}
207-2	0.42	4.70×10^{3}	0.48	0.61	1.56×10^{3}
208-1	0.44	1.33×10^{4}	0.49	0.63	4.56×10^{3}
208-3	0.45	1.32×10^{4}	0.55	0.64	5.37×10^{3}
209-1	0.45	3.80×10^{4}	0.40	0.71	9.61×10^{3}
209-2	0.46	3.76×10^{4}	0.40	0.73	9.50×10^{3}
209-3	0.47	3.77×10^{4}	0.45	0.70	1.14×10^{4}
211-1	0.45	1.35×10^{4}	0.55	0.61	5.49×10^{3}
212-1	0.46	3.77×10^{4}	0.43	0.70	1.04×10^{4}
212-2	0.46	3.81×10^{4}	0.43	0.70	1.06×10^{4}
212-3	0.45	3.98×10^{4}	0.43	0.69	1.12×10^{4}

資料4（つづき）

Basic data 4. (continued)

Run	$\overline{K}$	Re	d/H_0	$\overline{K}_d$	Re_d
301-2	0.43	5.94×10^3	0.46	0.63	1.85×10^3
302-1	0.42	1.69×10^4	0.45	0.63	5.09×10^3
302-2	0.46	1.68×10^4	0.45	0.69	5.07×10^3
303-1	0.45	4.76×10^4	0.40	0.71	1.20×10^4
303-2	0.45	4.75×10^4	0.45	0.67	1.43×10^4
303-3	0.45	4.27×10^4	0.45	0.67	1.29×10^4
305-1	0.46	1.69×10^4	0.46	0.68	5.26×10^3
305-2	0.46	1.69×10^4	0.50	0.65	5.98×10^3
305-3	0.46	1.67×10^4	0.50	0.65	5.91×10^3
308-1	0.47	1.67×10^4	0.49	0.67	5.71×10^3
308-2	0.47	1.66×10^4	0.45	0.70	5.02×10^3
308-3	0.45	1.69×10^4	0.50	0.64	5.96×10^3
309-1	0.48	4.70×10^4	0.45	0.72	1.42×10^4
309-2	0.48	4.77×10^4	0.40	0.76	1.21×10^4
309-3	0.47	4.77×10^4	0.50	0.66	1.69×10^4
311-1	0.46	1.67×10^4	0.52	0.64	6.27×10^3
311-3	0.47	1.68×10^4	0.46	0.69	5.23×10^3
312-1	0.47	4.71×10^4	0.45	0.70	1.42×10^4
312-3	0.48	4.74×10^4	0.49	0.69	1.63×10^4

資料5　$\overline{K}$の計算値一覧

Basic data 5. Calculational results of the average velocity $\overline{K}$

Run	$\overline{K}$	Re	d/H_0	$\overline{K}_d$	Re_d
DC800	0.450	1.69×10^4	0.44	0.678	4.93×10^3
DC801	0.450	1.69×10^4	0.45	0.671	5.10×10^3
DC802	0.447	5.97×10^3	0.46	0.659	1.86×10^3
DC803	0.455	4.78×10^4	0.45	0.678	1.44×10^4
DC804	0.442	1.69×10^4	0.46	0.652	5.27×10^3
DC805	0.447	4.78×10^4	0.45	0.666	1.44×10^4
DC820	0.450	3.15×10^4	0.45	0.671	9.51×10^3
DC821	0.445	1.11×10^4	0.43	0.679	3.13×10^3
DC822	0.426	2.14×10^3	0.45	0.635	6.46×10^2
DC823	0.441	9.90×10^3	0.46	0.650	3.09×10^3
DC824	0.435	7.00×10^3	0.46	0.641	2.18×10^3

A Study on the Hydraulic Characteristics of the Head of Bottom-Layer Density Currents

By

Tomoyuki TAKEUCHI

Summary

1. In recent years, as the problems related to coastal development, environmental conservation of water area and water resources development have become more serious and more complicated, it has become more important to clarify the hydraulic characteristics of the various kinds of density currents.

   In relation to reproduction of coastal fishery resources, formation of regular course for fish and coastal fishing ground reclamation, it is one of the most important problems in aquaculture engineering to investigate the characteristics of the head of bottom-layer density currents.

   This paper deals with hydraulic characteristics of the head of bottom layer flow of Densimetric Exchange Flow as far as that diffusion or mixing would be neglected.

2. Summarizing the previous studies on the head of density currents, two problems are noted as follows:

   (1) There exist some experimental results about shapes and velocities of the head. But, there is a wide difference among the results and a clear explanation has not yet been made on this point.

   (2) Although there were a few experimental results of internal structure of the head, it is very difficult to express quantitatively. Numerical simulation technique in the past was valid as far as relative density difference is larger than 0.05, but not valid in coastal water area for our purpose where the relative density difference is less than 0.03, because numerical catastrophe occurs in the surface region.

3. Considering the above-mentioned points, this study had the following objectives:

   (1) As to the shape and the velocity of the head, we should investigate the difference among the results in previous experiments, considering the time variation within a experiment or conditions of experiment.

   (2) As to the quantitative study of internal structure of the head, we should develop a two-dimensional numerical method modifying or extending the Marker-and-Cell method.

   (3) As to the verification of the numerical method, we should sufficiently compare the results of experiment and those of numerical simulation.

4. About the numerical method, free surface condition was applied more strictly to stabilize the calculation or to avoid the numerical catastrophe. At that time, variable

about water level was introduced to calculate surface inclination easily. The coefficient of viscosity was treated as a constant in whole calculational area in previous studies, but in this method the modelling of sub-grid scale eddy viscosity that is called Smagorinsky-Deardorff model has been introduced.

5. For experiment, the flume, 3 m in length, 20 cm in width and 50 cm in height was used. There was no groove for a gate and the gate was guided by four rubber sash rolers only.

   8 mm cinecamera has been used to record flow configulations. Time variation of the shapes and the velocity of the head was analyzed on the film.

6. The results of this study by both experiment and numerical simulation are as follows:

   (1) The head is immediately created after the flow started and the two-dimensional shape of the head has soon become almost constant. The part behind the head is quasi-steady.

   (2) It was confirmed that time averaged shape of the head which was non-dimensionalized by the thickness of the head is similar.

   (3) The velocity of the head U_f varies periodically to some extent and declines with time. The period of that variation is different with the length of the storage and the initial depth of the storage, but is not so different with the relative density difference.

   (4) As mentioned above, the velocity of the head varies with time, so the mean velocity in a experiment must be calculated carefully. This point was not marked in the past and the large variance of the results in previous experiments might have occurred for this reason.

   (5) In this study, the author got the data with small variance about the mean velocity of the head. In addition, the conditions of experiment were altered systematically, and therefore it was possible to make clear the mutual relations between the non-dimentional mean velocity $\bar{K}$ and the densimetric Reynolds number Re.

   (6) The head advances with internal vortex which rolls up the particles near the extreme point of the head. This phenomenon was observed in both experiment and numerical simulation. It has suggested the phenomenon of sediment rolled up that was observed in the field.

   Intermittent releasing of vortex was observed in experiments except the case with small depth. This phenomenon might be caused by three-dimensional structure of the head and was not observed in two-dimensional numerical simulation.

   (7) In numerical simulation, the value of vertical velocity in the head near the extreme point accounted for 30 to 70 percent that of horizontal velocity. Maximum horizontal velocity occurs 0.2 times inner side of the thickness of the head.

   (8) With starting of the flow, minute variation of water level occurs at both fresh water side and salt water side. At fresh water side water level rises and at salt water side water level drops and these propagate to both end of the channel. In a

short time reflection occurs and propagation and reflection alternately occur. Main cause of these variation of water level might be propagation and reflection of surface wave, but the effect of density difference should also be considered.

This phenomenon was made clear in detail for the first time in this study. The relation between the variation of water level and the velocity of the head was not clear quantitatively, but the strong correlation was observed qualitatively.

7. As have already been seen, the study was carried out on the hydraulic characteristics of the head of bottom-layer density currents both in experiment and in numerical simulation. In this study, we obtained good results on the quantitative study of density currents.

As the results of numerical simulation were in very good agreement with those of experiment, the validity of numerical technique modified and developed in this study was confirmed and the foundation was made for this technique to be applied to the coastal area.

The elucidation of the characteristics of the head of density currents is very important for the elucidation of the environment of aquatic life.

For example, the head of density currents is observed as a saline wedge against river, a fresh water or blackish water front for the sea and an ascending front of internal wave of cold mass to the continental shelf. And these fronts are concerned in transportation and sedimentation of plankton or suspended particles, transportation and accumulation of spawns, larvae and juveniles and formation of regular course for fishes.

Therefore, it is useful in the reclamation of nursery grounds and fishing grounds to understand the characteristics of the head.

As for the detail, one will have to wait for future studies, and the results of this study may provide some important basis for them.

水工研報告　4
1985　pp. 89～148

漁港港内の水面変動予測に関する研究**

山本正昭*

目　次

1.　緒言……89
　1.1　漁港の機能と静穏度……89
　1.2　港内静穏度に対する予測手法……90
2.　波の基本的予測法……91
　2.1　序……91
　2.2　波の浅水変形と砕波……92
　2.3　港口よりの回折波……104
　2.4　越波による港内伝達波……111
　2.5　漁港内の長周期波……114
3.　水理模型実験による予測法……117
　3.1　序……117
　3.2　模型の相似性について……118
　3.3　実験の装置と模型……121
　3.4　実験の手法……124
　3.5　模型実験例（三崎漁港）……125
4.　数値模型実験による予測法……130
　4.1　序……130
　4.2　基礎方程式……130
　4.3　境界条件……132
　4.4　計算手法……133
　4.5　波の変形に対する基本的検討……137
　4.6　数値模型実験の適用……139
　4.7　まとめ……140
5.　波高推定手法の不規則波への拡張……140
　5.1　不規則の基本的性質……140
　5.2　不規則波による水面変動の予測……142
6.　結　言……143
　謝辞……143
　参考文献……143

1.　緒　言

1.1　漁港の機能と静穏度

漁港とは漁業のための港，主に漁船が利用している港などというのが一般的概念であろうが，行政上は漁港法に基づいて指定された港を言い，農林水産大臣の管轄下におかれている。その数は現在約2,900港に及び，大は遠洋漁船や大型旋網漁船が集まる特定第3種漁港から，小は数十隻の沿岸漁船を収容する第1種漁港までさまざまな漁港が存在する。しかし，その大多数は第1種又は第2種の中小漁港である。

漁港は，流通上からは水産物がここで陸揚げされ，燃油や水などが積込まれ，海上と陸上との接点となっている。また，漁船の利用の面から漁港の機能を分類すると，①陸揚げ②出漁準備③休憩④避難の4つに区分できる。各漁港ではそれらの機能のうち，いくつかの機能を有しており，そのための施設の整備が遂行されている。

これらの機能を完遂するために具備すべき第一の条件としては漁港泊地の静穏度の保持であることは言うまでもない。すなわち，魚の陸揚げや資材の積込み時に，波によって漁船が揺れると作業能率が悪くなるばかりでなく，危険である。さらに，漁港は漁業者の生命とその財産たる漁船・漁具を守る避難場所ともなっている。嵐の時には，大型貨物船などは沖へ避難することが多いが，小さい漁船は漁港などの静穏な場所を求めて避難する。従って，避難港はどんな荒天時にも生命と，財産とを保護しうるものでなくてはならない。

中小漁港の立地上の特徴は，漁村または漁場に近接して在ることである。そのため前述の如く港数も多く，必然的に1港当りの投資規模も小さくなる。この様な理由で漁港の水深は小さく砕波帯の内に位置することが多く，砕波帯内での静穏度の研究が漁港の場合には重要である。

静穏度という言葉は泊地が静かで使い易いかどうかと

---

*　水産土木工学部漁港水理研究室

**　本論文は，著者の学位請求論文をまとめ直したものである。本論文に対して，昭和58年12月九州大学より農学博士の学位が授与された。

いう程度の総合的な表現であり，数式的な定義はない。ただ，今まで用いられた目安としては，港内の波の静かさで表現する場合が多い。波浪のほかセイシュなどの長周期波，潮流，風などが影響している。特に荒天時における港内での衝突事故には，長周期波が強く影響していることが多く，砕波帯内に築造される漁港の大きな問題である。

1.2　港内静穏度に対する予測手法

この論文では，港内静穏度に関係する要素のうち大半を占める波浪や長周期波などの水面の変動について，その予測方法を論じた。

風域内で発生した波浪は海岸に近づくにつれて浅水変形を生じ，屈折がおこり，ある場合は砕波となり，港域に達する。その後，港内に伝わる波は，防波堤のない港口部や潮通し部からの回折波，防波堤材料が透水性の場合の透過波などが考えられ，これらの波が港内で反射しかつ共振を生ずる場合もある。

したがって，港内の波浪を予測するには，上述の現象を表わす理論を継ぎ合わせる方法，即ち，沖波波高に浅水係数（Ks），屈折係数（Kr），回折係数（Kd），伝達率と透過率（Kt）等を掛け合わせ，更に港内での反射波を合成する方法と，実験的方法，即ち，造波水槽内での水理模型実験や電算機を用いる数学モデルによる数値実験に大別される。

前者の理論的方法は，概略の推定値を求めるのには適しているが，現実の漁港に適用しようとする場合，種々の困難がある。たとえば，次の①～⑦の状況下では解析は不可能，又は精度が悪く，模型実験によらなければならない。

①屈折については，地形が複雑な場合や球形浅瀬がある場合など，波向線が交差する場合。

②回折についても二重回折後の波の予測。

③一様斜面とみなせない場合の砕波後の波高予測。

等々である。さらに，2つ以上の現象が同時に生じる場合，たとえば，

④港口部付近で水深変化があり，回折と屈折を同時に考慮する必要がある場合，

⑤波に起因する流れがあり，波の変形をもたらす場合。

⑥波の相互干渉による岸壁沿いの波高変化。

⑦複雑な港形の場合の長周期による副振動。

などが挙げられる。これらのことに加えて，大多数の漁港は，港内が複雑な形状をしているため，港内での回折反射の繰返しがおこり，解析が極めて困難な場合が多い。

このような場合に採られる港内静穏度の予測方法として，模型実験がある。以前は波の模型実験と言えば，水槽実験のことであったが，近年のコンピュータ技術の発達により，水理現象の解明にも数値シミュレーションが使われてきている。その手法の主流は差分法であるが，最近，有限要素法が波の分野でも使われてきている。この差分法には種々の解法がある。標準的方法は，模型の形状を等間隔で組んだ格子点で表わし，基礎方程式を差分近似して各格子点ごとに逐次演算するものである。この方法で潮汐や津波など長波のシミュレーションは従来から研究が重ねられていたが，著者は，境界条件などに改良を加えて，波浪のシミュレーションに適用できるようにした。この数値模型実験は，その手法の改良と電算機の目覚ましい発達により，費用も徐々に安価になっているとともに，特殊な実験装置が要らない，人手がかからない，即応性があるなどの特徴が挙げられる。この手法は，小しけの時の静穏度実験や長周期波の実験に適している。

一方，水槽模型実験は実験施設，費用，労力を要すが充分な精度の実験ができ，種々の施設配置案の検討を総合的に行うのに適している。特に港口部が砕波帯内にある場合の港内静穏度予測には有力である。

以上のような港内波浪を予測する手順を示すと，図1-1のようになる。

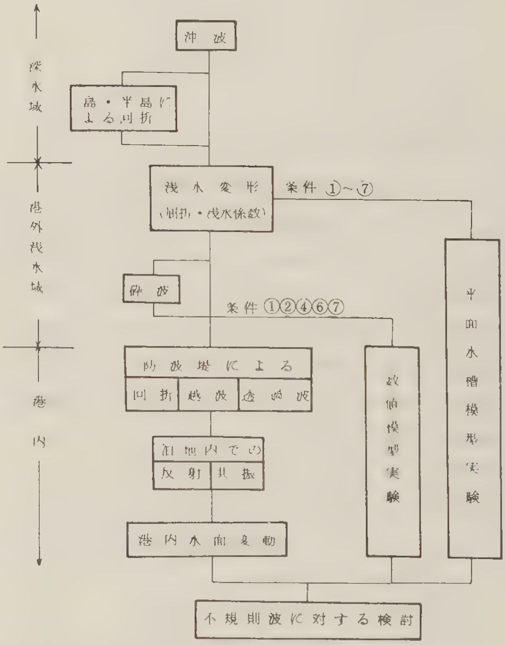


図 1-1　港内波浪の予測手順

estimation process of wave in a port

2. 波の基本的予測法

2.1 序

波の伝達に関する基本的理論を応用した港内静穏度の予測は現在最も多く用いられている。この方法は種々の波の変形理論を継ぎ合わせるものであり，個々の理論はほぼ完成されたものであるが，その継ぎ方や適用範囲に問題がある。著者は，この方法を漁港で利用する場合に重要になると思われる2，3の問題について改善を試みた。それらは，砕波点内外の波高の算定方法の改良，二重回折波高の算定および漁港内長周期波の算定の試みなどである。以下にこれらの概要を述べる。

浅水域における水深変化のみによる波高の変化は Airy1) の微小振幅波理論によるエネルギーの伝達速度から導かれたが，その後，極浅水部での誤差が大きいことから，Laiton ら2)によるクノイド波，岩垣3) によるハイパボリック波，Munk4) による孤立波の理論などが導びかれた。また，首藤5) は波高変化のみに着目して微小振幅波から極浅水波までの波高を連続的に導いた。

波の砕波点に関する理論的研究としては，深海部では Michell6) が限界波形勾配H/L＝0.142を求め，浅海部では McCowan7)が孤立波の理論より波高水深比 $Hb/hb=$0.78 を導びいている。又，実験値としては，Iversen8)，合田9) の報告などがある。これらは波形勾配だけでなく，海底勾配も砕波には大きく影響する結果を導いている。砕波後の波高減衰については，理論として Longuet-Higgins10)の radiation stress 理論があるが，直接波高を求めたものではなく，実用上は，佐々木11)らの実験，中村12)らの実験などの実験報告が大半を占めている。

著者40)は，上記のような実験的成果を基にして，浅水域に達した波の波高急変，砕波，波高減衰に至る一連の変化を連続的に算定する方法を開発し，さらに，波高の分布，水位の上昇及び変動などの不規則要因を加味した不規則波の波高変化の予測方法を提案した。

波の回折についてはPenny & Price13)は Sommerfeld の光の回折理論を用いて半無限堤の回折波を計算し，さらに，2本の防波堤先端の回折を重ね合わせることによって，開口部からの回折計算を行った。

著者は又，漁港の防波堤配置形でよく見られるように2本の防波堤が一直線上にない場合について系統的に水理模型実験を行い，Sommerfeld の解の重ね合わせによる二重回折計算が，この場合にも妥当かどうか検証した。

越波による2次発生波については，関係する要素が進行波高，周期，水深，堤体天端高，堤体設置水深，マウンド上の水深，海底勾配等々数多くあり，一般化することには困難がある。Jeffreys14) や Fuchs15)は潜堤についてその高さと堤幅変化による伝達率を理論的に求めたが適用できる堤高が低すぎるため，漁港の設計には実用的でない。また，近藤・佐藤16)は入射波，伝達波とも孤立波とみなして波高伝達率の近似解を求めている。一方，わが国で用いられている越波に対する実用的な推算式としては，合田・竹田17)の実験式や近藤・佐藤18)の実験式が著名である。

これに対し著者19)は，漁港の防波堤が主に砕波帯内にあることにかんがみ，砕波帯内に設置された防波堤よりの越波による港内伝達波に関する実験的研究を行った。その結果，砕波帯内の波高伝達率は，従来の実験式よりはるかに大きくなるという結果を得た。

防波堤が捨石や捨ブロックで造られている場合は，50%内外の空隙率を有する。そのため，この間隙を通って波が堤内へ伝わってくる。その過程で，入射波エネルギーの一部は反射し，残りは，そのエネルギーを消耗しながら堤体内を通過する。エネルギー減殺機構モデルの1つにパイプモデルというものが首藤20)そのほかにより提案されている。また，模型実験値としては，沼田ら21)の式を基にした三浦・遠藤22)の実験式が透過波の実験値をよく説明している。

このようにして，港内に侵入した波は港内全域に拡がって行き，岸壁に到達すると反射を生じ，方向を変えて進行する。漁港の泊地は，一般に狭いため反射が何度も繰返されて港内静穏度を悪くする。よって，構造物背後への波の廻り込みについては回折現象だけでなく，この反射の影響も大きい。この様な波の多重反射の算定法については，波の折り返し回折図法が合田23)によって考案された。

以上のような波浪による擾乱のほかに，港内静穏度上問題となるのは長周期波である。港内に認められる，潮汐より短く，波浪より長い周期の水面の上下動は“セイシュ，副振動および，共振状態であるビーティングなどの複合であって，総称してサージングという。”と水理公式集に記されている。漁港では，その周期が1～数分のものが泊地と共振を生じ，静穏度上問題となっており，大規模港湾で問題とされている周期より1ケタ小さいのが特徴である。

この現象は Miles & Munk24) の研究では，共振現象により港口幅を狭めても必ずしもそれが小さくなるとは限らないことから，“Habour Paradox”と名付けられ有名になった。しかし，Mehaute ら25)はこれに反論している。日本においても宇野木ら26)が湾や港の固有振動に注

目して研究を行っているが，潮位計記録を基にしているため，対象としている周期が長い。

港内長周期振動を予測するにあたり，現在は港口部でのエネルギー消耗の問題と，原因外力の究明が続けられている。

2.2　波の浅水変形と砕波

2.2.1　研究概要

波が海岸に近づくと海底地形の影響をうけて浅水変形，屈折，砕波などにより波高，波長を変化させる。そしてそれらの変化，特に浅水変形，破波については，これまで数多くの理論的，あるいは，実験的研究が行われて海岸，港湾構造物の各種の設計基準にも取入れられている。しかし，この中で用いられている理論等は，微小振幅波理論，孤立波の限界波高，砕波指標など箇別の理論を継ぎ合わせたものであり，不連続なものとなっている。本研究では過去の各種の研究を組み入れて，一つの波が深水域より砕波点を経て，汀線まで達する際の波高変化を連続的に推定する計算モデルを一様水深変化について作成した。

さらに，このモデルの不規則波への応用を試みた。不規則波の浅水変形の研究には合田の研究[27)]があり，これにおいては，①砕波は波高のある幅にわたって起り，破波の確率はその範囲内で直線的に変化する。②砕波した波は波高の残存部の確率密度に比例した確率で再生すると仮定している。一方著者は，別の角度から，不規則波を構成する成分波に着目し，その成分波の砕波以後の変形は，規則波の変形と同じであり，単一規則波の砕波高および砕波後の波高変化が単純に加え合わせができるものと仮定した。すなわち単一規則波の波高変化を求める規則波の計算モデルを基礎に，波の不規則性を表わす要素として，波高の分布（本モデルではレーリー分布）のみを考え，これにサーフビートを付加して，不規則波の浅水変形計算モデルを組み立てた。そして，このモデルを使って水位および波高の変化を求めた。

2.2.2　規則波の計算モデル

(1)　砕波前の波高変化

波が沖から岸に近づく場合，水深が波長の約½までは影響せず，これより浅くなると海底の影響を受けて，波速，波高とも変化する。この場合，単位幅をもつ2断面でエネルギー損失がないものと仮定し，単位時間当りエネルギーの収支が等しいと置くと，微小振幅波理論により浅水係数（K_S）は次の式(2-1)で与えられる。ここにkは波数（$2\pi/L$）である。

$$K_S=\frac{H}{H_0}=\left[\left(1+\frac{2kh}{\sinh 2kh}\right)\cdot\tanh kh\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}1)$$

しかし，波が浅い所へ進入すると実際には，波高は水深に対してある有限の大きさを持つようになるため，微小振幅波の仮定から外れていく。その場合浅水係数は，式(2-1)より離れた値となり急激に増大する。こうした有限振幅波理論による浅水係数については，岩垣ら[3)]のハイパボリック波および，ストークス波，首藤[5)]の長波の浅水変形式などの研究がある。そこで，本モデルに導入する浅水係数としては首藤による実用式(2-2)の(c)の部分を(2-2′)式の様に修正して用いることとした。

$$\left.\begin{array}{lll}
\dfrac{gHT^2}{h^2}\leq 30 & :\text{式}(2\text{-}1) & \cdots\cdots(\mathrm{a})\\[2ex]
30<\dfrac{gHT^2}{h^2}\leq 50 & :H\cdot h^{2/7}=\mathrm{const} & \cdots\cdots(\mathrm{b})\\[2ex]
50<\dfrac{gHT^2}{h^2} & :H\cdot h^{2/5}\sqrt{\dfrac{gHT^2}{h^2}}-2\sqrt{3}=\mathrm{const} & \cdots\cdots(\mathrm{c})
\end{array}\right\}(2\text{-}2)$$

$$50<\frac{gHT^2}{h^2}\quad :H\cdot h^{1/2}=\mathrm{const} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}2')$$

原式を用いた場合，図2-1に示すように，首藤の浅水係数と砕波指標の砕波波高とに隔りがある。そのため，著者は，砕波指標の曲線に，より近づくよう修正を行ったものである。

参考までに式(2-1)，(2-2-b)，(2-2′)の計算結果を図2 2に示す。

(2)　砕波限界波高の表示式

浅水変化で問題となるのは，特定水深における砕波限界波高をどのように表示するかである。海底勾配と波形勾配を考慮したものとして，Iversen[8)]の実験値及び合

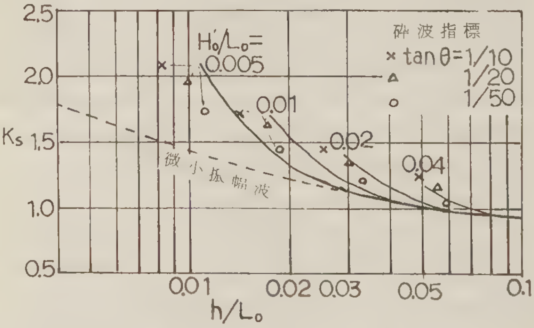


図 2-1　首藤の浅水係数と砕波指標の比較

Non-linear shoaling coefficient and breaker index

田9)の砕波指標などがある。ここでは合田の発表した砕波指標のうちH_b/L_0の曲線群を数式化したもの28)を，さらに式(2-3)のように乗数を若干修正して用いることとした。

$$\frac{H_b}{h_b}=0.17\left(\frac{h_b}{L_0}\right)^{-0.9}\times\left\{1-\exp\left[-1.5\pi\left(\frac{h_b}{L_0}\right)^{0.9}\left(1+15\tan^{4/3}\theta\right)\right]\right\}\quad\cdots\cdots(2\text{-}3)$$

ここに$\tan\theta$は海底勾配である。

修正を加えたのは2，3の試行の結果，図2-3に示すように計算値がより砕波指数に近づくことが判明したからである。

(3) 砕波後の波高変化

砕波した波は急激にエネルギーを失い，波高を減小しながら進行する。この砕波後の波高変化はこれまでの研究によれば，海底勾配，沖波波形勾配，砕波の種類（巻き波か崩れ波か），砕波点からの距離などの影響を受ける極めて複雑な現象である。したがって，これを精度よく数式化することは，不可能と思われる。しかし，この計算モデルでは必要なのでBowen29)が仮定した式(2-4)を基本にし，γの関数形としては佐々木ら11)の実験式(2-5)を，検討し式(2-6)で近似させることとした。

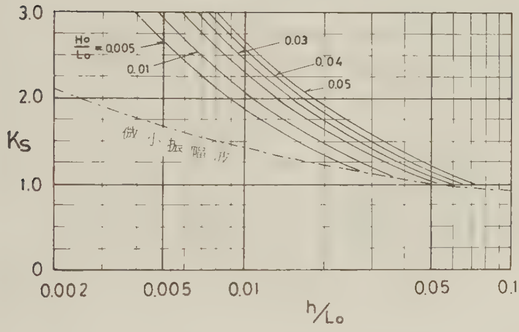


図 2-2　計算に使用した非線形浅水係数

Non-linear shoaling coefficient in a modified form

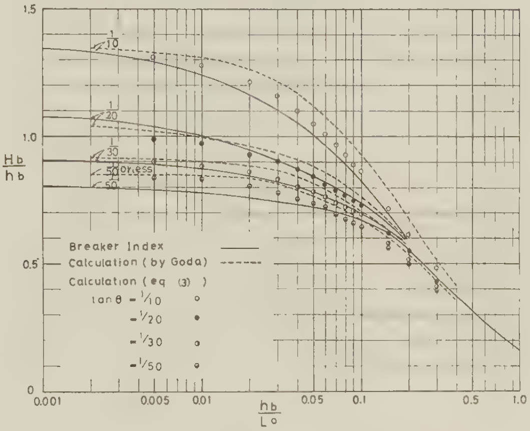


図 2-3　砕波の波高と水深

Wave height and depth at breaking point

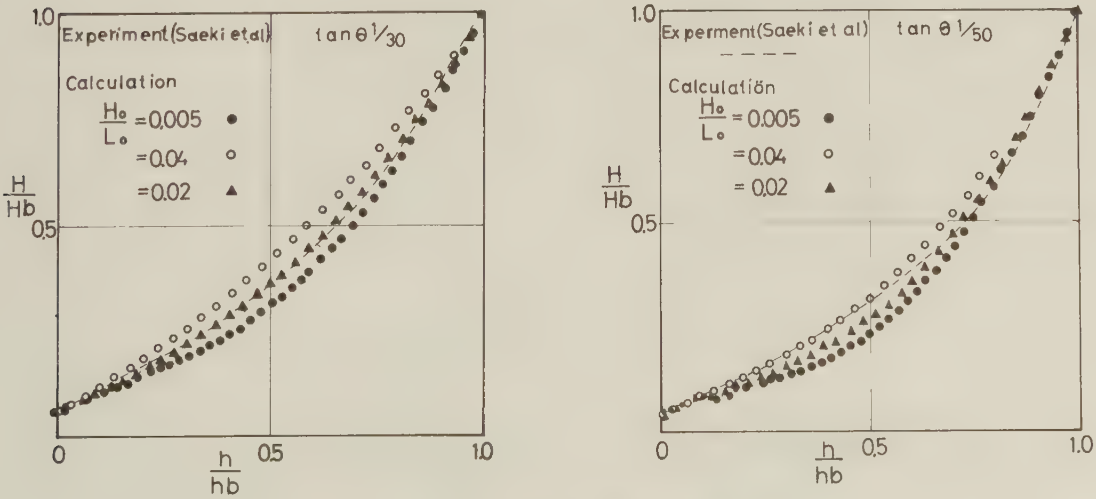


図 2-4　砕波後の波高の実験値と計算結果

Wave height change after breaking (experiment and calculation)

$$H=\gamma(h+\bar{\eta}) \quad \cdots\cdots(2\text{-}4)$$

ここに，$\bar{\eta}$は水深hにおける砕波による水位上昇量，

$$\left.\begin{aligned} \gamma&=ah^2+bh+\gamma_0 \\ a&=(3\gamma_b+3\gamma_0-6\bar{\gamma})/h_b{}^2 \\ b&=(-2\gamma-4\gamma_0+6\bar{\gamma})/h_b \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(2\text{-}5)$$

ここに，γ_bは砕波水深（h_b）におけるγ，γ_0は汀線（$h=0$）におけるγであり，$\bar{\gamma}$は砕波水深から汀線までの区間のγの平均値であり，それぞれ次の式（2-6）で計算することとなる。

$$\left.\begin{aligned} \gamma_b&=H_b/h_b \\ \gamma_0&=(0.35+5\tan\theta)\cdot\gamma_b \\ \bar{\gamma}&=\left\{\frac{8}{3}\cdot\frac{0.7(0.015+3.85\tan\theta)}{1-0.7(0.015+3.85\tan\theta)}\right\}^{1/2} \end{aligned}\right\} \cdots(2\text{-}6)$$

(4) 平均水位の変化

式（2-6）を見てわかるように砕波後の波高変化は同時に水位変化に関連している。この水位変化は，wave set-up または wave set-down と呼ばれる現象で最近注目を集めている。1962年 Longuet-Higgins & Stewart[10] はこの現象が radiation stress によって起こされるものであることを，すなわち，波が伝わる際に，波の進行方向に運動量の輸送を伴うことによって生じる応力で，波高の2乗に比例することを明らかにした。この理論より式(2-7)が導かれている。

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx}=-\frac{1}{(h+\bar{\eta})}\cdot\frac{d}{dx}\left[\frac{1}{8}H^2\left(\frac{2kh}{\sinh 2kh}+\frac{1}{2}\right)\right] \quad \cdots\cdots(2\text{-}7)$$

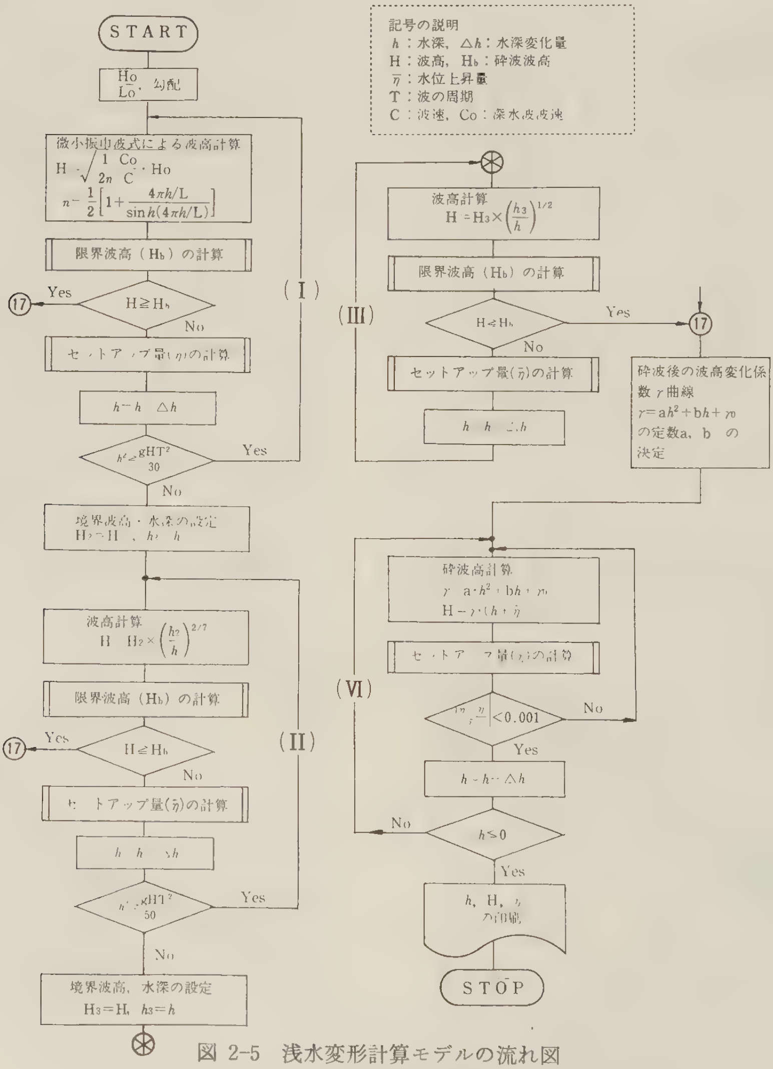

START
Ho/Lo，勾配
微小振巾波式による波高計算
$H=\sqrt{\frac{1}{2n}\frac{Co}{C}}\cdot Ho$
$n=\frac{1}{2}\left[1+\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)}\right]$
限界波高（Hb）の計算
H≧Hb
Yes
No
⑰
セットアップ量（η̄）の計算
h=h−△h
$h \geq \frac{gHT^2}{30}$
Yes
No
（Ⅰ）
境界波高・水深の設定
H2=H，h2=h
波高計算
$H=H_2\times\left(\frac{h_2}{h}\right)^{2/7}$
限界波高（Hb）の計算
H≧Hb
Yes
No
⑰
セットアップ量（η̄）の計算
h=h−△h
$h \geq \frac{gHT^2}{50}$
Yes
No
（Ⅱ）
境界波高、水深の設定
H3=H，h3=h
⊗
記号の説明
h：水深，△h：水深変化量
H：波高，Hb：砕波波高
η̄：水位上昇量
T：波の周期
C：波速，Co：深水波波速
⊗
波高計算
$H=H_3\times\left(\frac{h_3}{h}\right)^{1/2}$
限界波高（Hb）の計算
H≧Hb
Yes
No
⑰
セットアップ量（η̄）の計算
h=h−△h
（Ⅲ）
砕波後の波高変化係数γ曲線
γ=ah²+bh+γ0
の定数a，bの決定
砕波高計算
γ=a·h²+bh+γ0
H=γ·(h+η̄)
セットアップ量（η̄）の計算
$\left|\frac{\eta_i-\eta}{\eta}\right|<0.001$
No
Yes
h=h−△h
h≦0
No
Yes
（Ⅵ）
h，H，η̄の印刷
STOP

図 2-5　浅水変形計算モデルの流れ図

Flow chart of a wave transformation due to changing depth

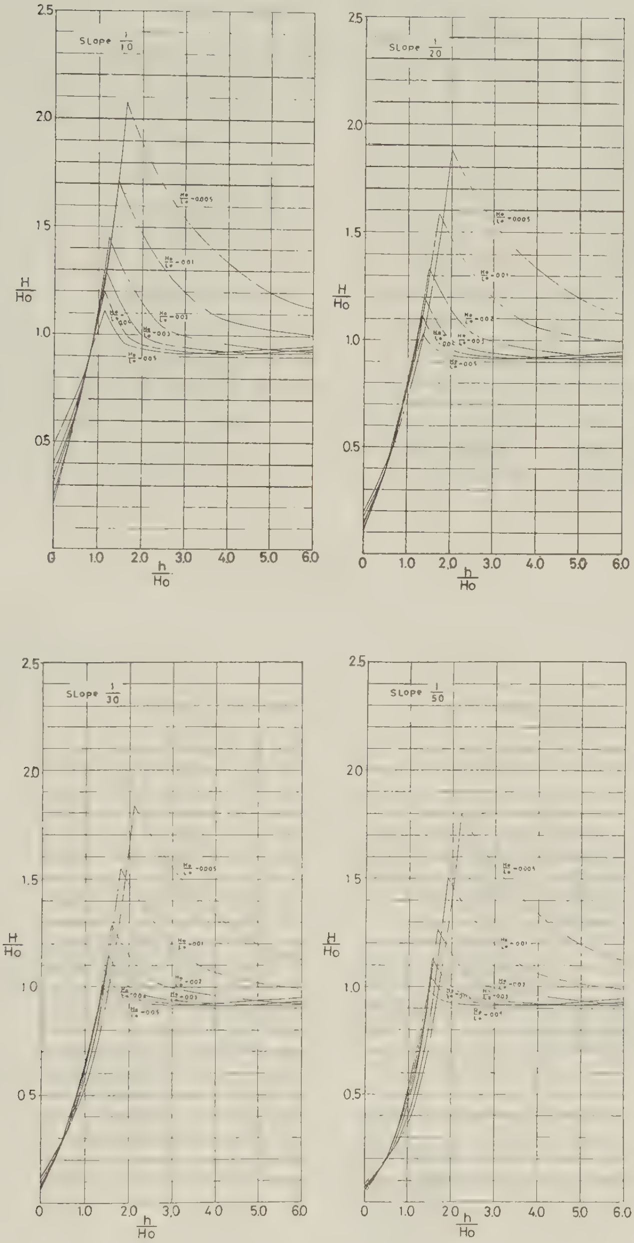
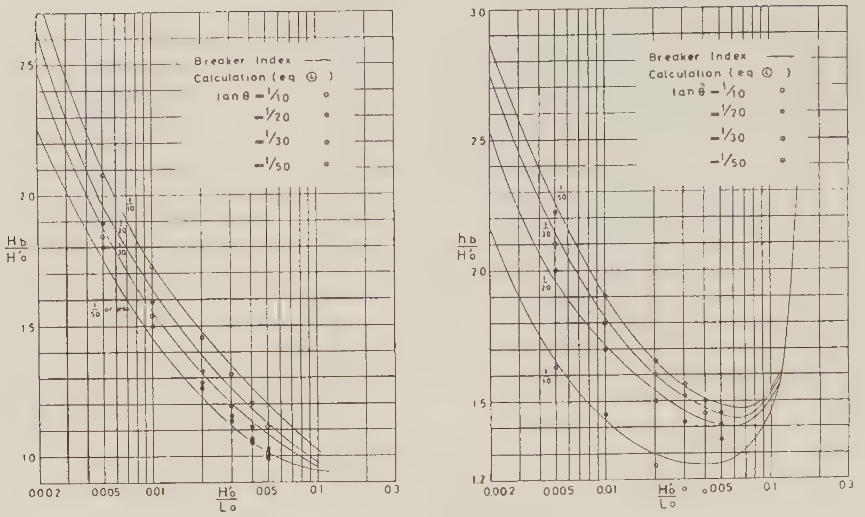


図 2-6　規則波の波高変化

Wave height change in regular wave

この式から波高が増大する領域では平均水位が下降し，逆に波高が減少する領域では平均水位が上昇する。本モデルでは式（2-7）を次の式（2-8）のように書き直したものを用い沖側からの逐次計算により水位変化を求める。

$$\left.\begin{aligned}&\bar{\eta}_{i+1}=\bar{\eta}_i-\left(\frac{K_E}{\bar{\eta}+h}\right)_{i+1/2}(H_{i+1}{}^2-H_i{}^2)\\&\text{ここに,}\\&K_E=\frac{1}{8}\left(\frac{2kh}{\sinh 2kh}+\frac{1}{2}\right)\\&\bar{\eta}_{i+1/2}=\bar{\eta}_i+(\bar{\eta}_i-\bar{\eta}_{i-1})/2\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(2\text{-}8)$$



（a）　（b）

図 2-7 計算結果と碎波指標曲線

Comparison between coputed wave brakers and breaker index

サフィックス $i+½$ は h_i と h_{i+1} の中央点における値を意味している。

(5) 計算モデルの組立て

電子計算機によるプログラムの流れは図2-5のようになり，入力データは H_0/L_0 と $\tan\theta$ の2つである。まず $h_0/L_0=0.5$，$H=H_0$ とし，〔I〕，〔II〕，〔III〕それぞれのルーチンで Δh づつ水深を減じて，波高および水位変化量を式(2-2)及び(2-8)で計算し，その都度，H_b との大小比較により碎波の判定を行う。

碎波後のルーチン〔IV〕においては，波高と水位変化量は互いに関連しているため繰返し計算により，誤差が微小となった時に次の水深へ計算を進める。

2.2.3 計算結果

前述のように本計算モデルの入力データは，沖波波形勾配 H_0/L_0 と海底勾配 $\tan\theta$ の2つである。漁港工事などで実際問題となる範囲は，$H_0/L_0=0.005〜0.05$，$\tan\theta=0.01〜0.1$ であるので，今回の計算では，波形勾配6種（0.005，0.01，0.02，0.03，0.04，0.05）海底勾配7種（$^1/_{10}$，$^1/_{15}$，$^1/_{20}$，$^1/_{30}$，$^1/_{40}$，$^1/_{50}$，$^1/_{60}$）の組合せ42ケースを行った。

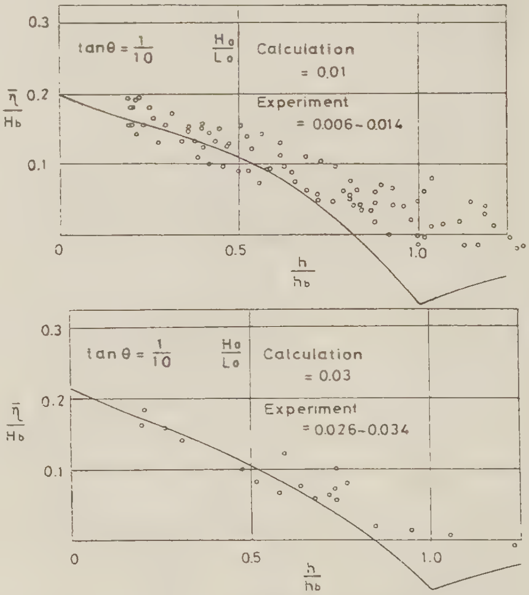


図 2-9 平均水位上昇量の実験値と計算結果

Comparison of wave set-up between experiment and calculation

1) 波高変化

各海底勾配ごとに，横軸に h/H_0，縦軸に H/H_0 をとり，パラメータに H_0/L_0 をとって波高計算結果を示すと，例えば図2-6のようになる。この図で H/H_0 の最大値は碎波高と沖波波高との比を示し，この値の生ずる h/H_0 は碎波水深と沖波波高との比であり，本計算モデルによる碎波特性である。そこで合田による碎波指標と本計算モデルの碎波特性との関係を比べたものが図2-7である。これによると碎波高，碎波水深ともおおむね5％以内の差で一致しているようであるが，$H_0/L_0>0.02$ の場合の碎波水深 h_b/H_0 の値で10％程度の差がある。この不一致は碎波指標曲線と式(2-3)との遊離および式(2-

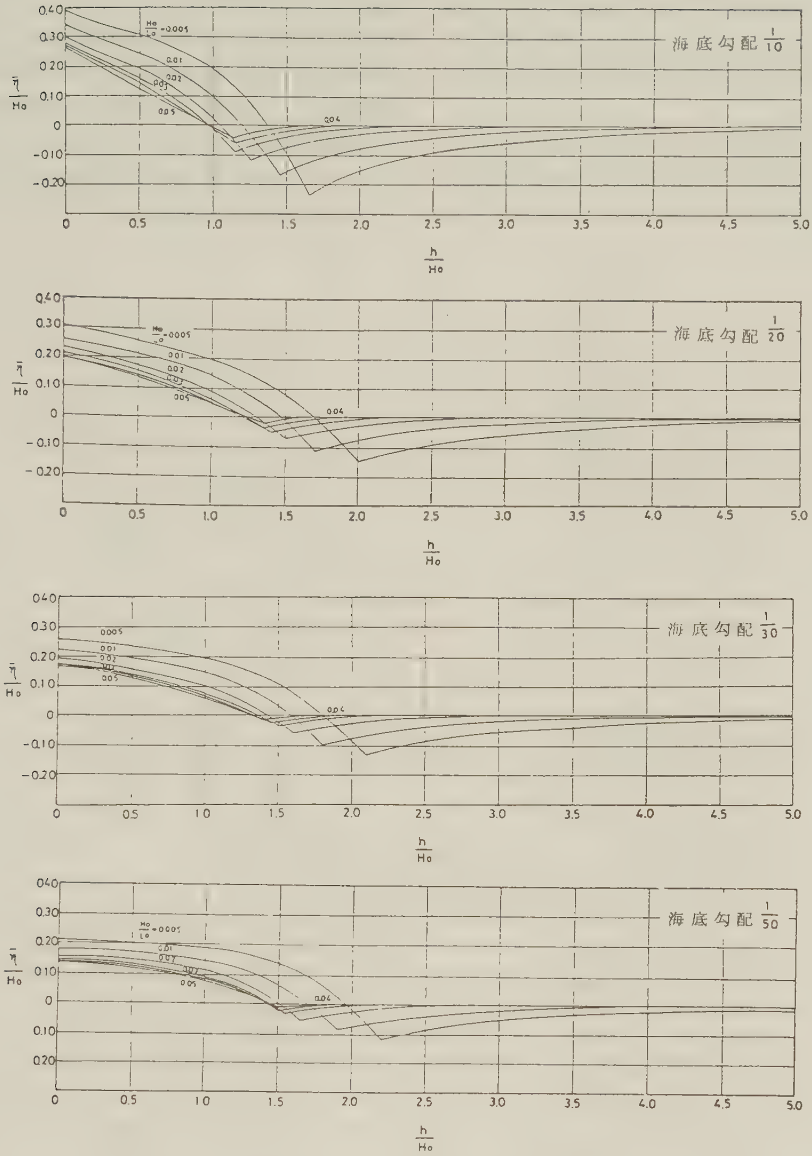


図 2-8　平均水位の計算結果
Computed mean sea level

2）と実験値との遊離の相乗効果に原因していると思われるので，さらに小さくすることは困難であろう。しかし，砕波指標はもともと相当ばらついた実験データの平均値として得られたものであり，それとの不一致がこの程度であれば，実用的には許容されるものと考えられる。

次に，砕波後の波高変化について佐々木らの実験結果と比較したところ，各勾配ともほぼ良好な一致を見せている（図 2-4 参照）。

⑵　平均水位の変化

波高変化と同じように平均水位の計算結果を図 2-8 に示した。いずれの場合も汀線に近づくにつれて平均水位がいったん低下し，それから急激に上昇している。しかし，この上昇の度合は，さらに汀線に近づくにつれて鈍化する。他の海底勾配の結果も合わせて考察すると，平均水位の上昇は海底勾配が緩かな程深くから始まるが，

汀線付近における上昇量は海底勾配が急な程大きいことおよび沖波波形勾配が小さい程，砕波点での水位降下ならびに，汀線付近の水位上昇が著しいことが特徴的である。

菅原ら[30)]が先に行った砕波による港内の水位上昇に関する実験結果と本計算モデルによる計算結果とを図2-9に示すと，実験値では砕波点付近での水位降下は見られず，この付近での不一致は大きいが，$h/h_b<0.7$の区域ではよく一致している。砕波点付近での水位下降量の測定は，砕波点が実験中変動することもあって，非常に困難であり，したがって水位の面から本計算モデルの妥当性をこれ以上検討することはできなかった。

2.2.4　不規則の浅水変形計算モデル

(1)　計算モデルの概要

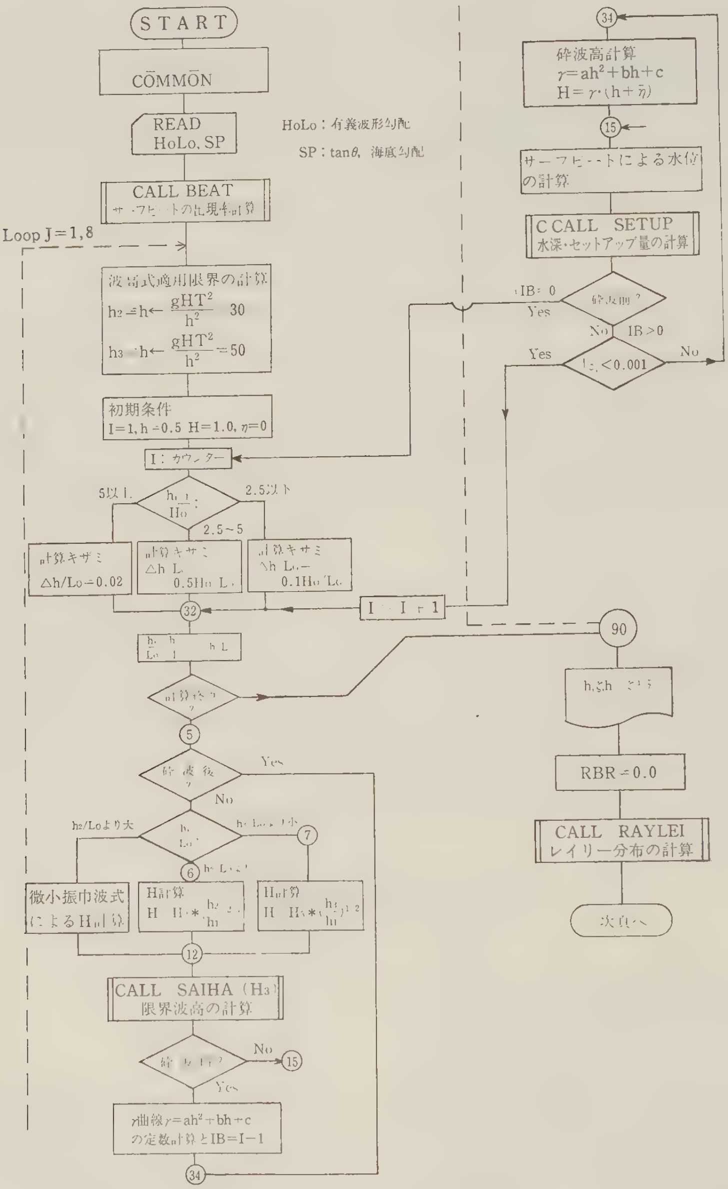

START
COMMON
READ
HoLo, SP
HoLo：有義波形勾配
SP：tanθ，海底勾配
CALL BEAT
Loop J=1,8
波高式適用限界の計算
$h_2 \doteqdot h \leftarrow \frac{gHT^2}{h^2}$　30
$h_3 \doteqdot h \leftarrow \frac{gHT^2}{h^2} \doteqdot 50$
初期条件
$I=1, h \doteqdot 0.5$　$H=1.0, \eta=0$
I：カウンター
5以上
2.5以下
2.5～5
計算キザミ
$\triangle h/Lo \doteqdot 0.02$
計算キザミ
計算キザミ
32
I＝I＋1
計算終り？
5
碎波後？
Yes
No
h₂/Loより大
7
6
微小振巾波式
によるH計算
H計算
H計算
12
CALL　SAIHA（H₃）
限界波高の計算
No
15
Yes
γ曲線 $\gamma=ah^2+bh+c$
の定数計算とIB=I−1
34
34
碎波高計算
$\gamma=ah^2+bh+c$
$H=\gamma\cdot(h+\bar{\eta})$
15
サーフビートによる水位
の計算
C CALL　SETUP
水深・セットアップ量の計算
IB＝0
Yes
No
IB＞0
Yes
＜0.001
No
90
RBR＝0.0
CALL　RAYLEI
レイリー分布の計算
次頁へ

図 2-10　プログラムの流れ

Flow chart of a wave deformation program about irregular wave

実際の海の波は前述のモデルのような同じ波高で同じ周期の規則的な波だけでなく，波高や周期が一波一波異なる不規則な波である。さらに副次的に平均水位も変動するという複雑さがあるが，その周期や波高の分布は，統計的法則に従っている。すなわち，波高の分布および周期の２乗の分布は，一般に，Raylei 分布31)に従うとされている。しかし，ここでは砕波点前後の波高分布を求めるため，周期の分布は，沖波波高の分布に比して影響が小さく無視できるという前提をたて，これを考慮していない。この **2-2-4** では前述の規則波の浅水変形計算モデルを基に，サーフビートによる水位変動と，波高のRaylei 分布を計算ルーチンに組込み，不規則波の浅水変形計算モデルを作成した。

このプログラムのフローチャートを図2-10に示す。こ

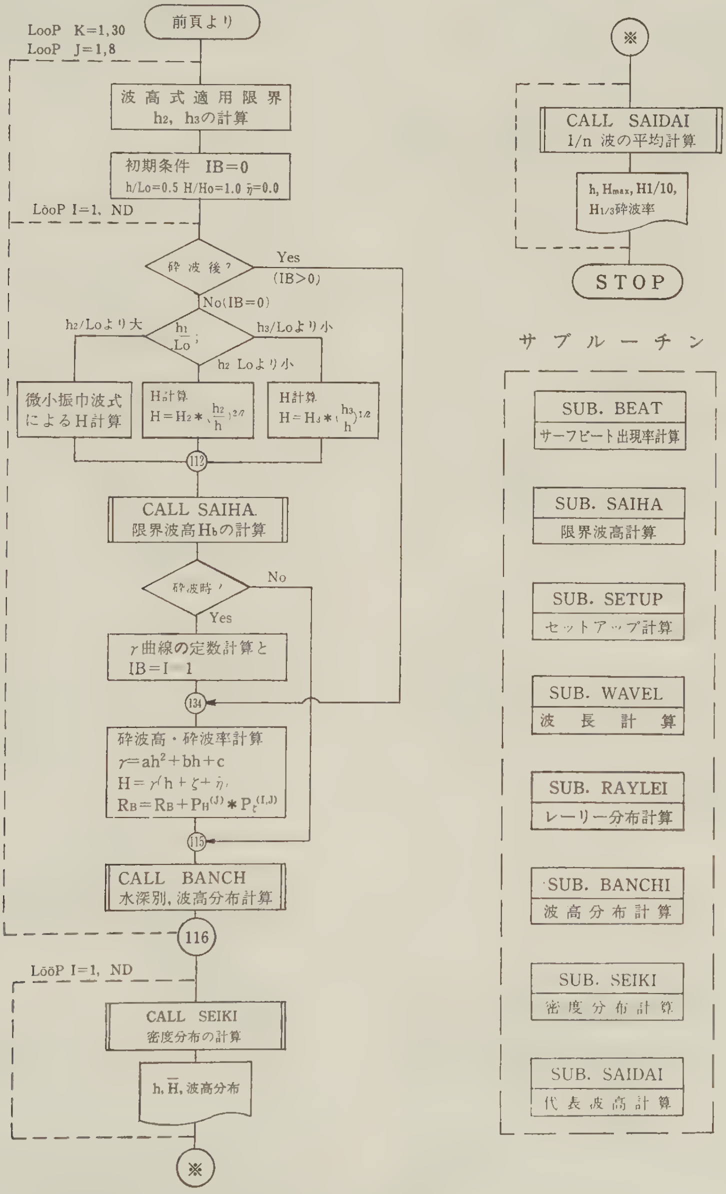

前頁より
LooP K=1,30
LooP J=1,8
波高式適用限界
h2，h3の計算
初期条件 IB=0
h/Lo=0.5 H/Ho=1.0 η̄=0.0
LooP I=1，ND
砕波後？
Yes
(IB>0)
No(IB=0)
h2/Loより大
h1/Lo；
h3/Loより小
h2 Loより小
微小振巾波式によるH計算
H計算 H=H2＊(h2/h)^2/7
H計算 H=H3＊(h3/h)^1/2
112
CALL SAIHA
限界波高Hbの計算
砕波時？
No
Yes
γ曲線の定数計算と IB=I 1
134
砕波高・砕波率計算
γ=ah²+bh+c
H=γ(h+ζ+η̄)
RB=RB+PH(J)＊Pζ(I,J)
115
CALL BANCH
水深別，波高分布計算
116
LooP I=1，ND
CALL SEIKI
密度分布の計算
h，H̄，波高分布
※
※
CALL SAIDAI
1/n 波の平均計算
h，Hmax，H1/10，H1/3砕波率
STOP
サブルーチン
SUB. BEAT
サーフビート出現率計算
SUB. SAIHA
限界波高計算
SUB. SETUP
セットアップ計算
SUB. WAVEL
波長計算
SUB. RAYLEI
レーリー分布計算
SUB. BANCHI
波高分布計算
SUB. SEIKI
密度分布計算
SUB. SAIDAI
代表波高計算

図 2-10 （つづき）

の計算プログラムの前半においてサーフビートおよび wave set-up の計算により平均水位の分布を水深ごとに求めた。プログラムの後半の波高計算ルーチン部は，前半で計算した水位について，Raylei 分布の各区間平均波高の浅水変化を計算し，水深ごとに波高分布を求め，さらに代表波高を計算するルーチンである。

(2) サーフビートと wave set-up

天然海浜において波が砕けている場合，1～数分周期の水位の上下動が起こることが認められており，Munk[32] はこれをサーフビートと名づけた。この発生原因については種々の説があるが，Longuest-Higgins & Stewart[10] は砕波によって生じる平均水位の場所的変化が波高の不規則性のために時間的に緩かに変動し，これが岸で反射されて長周期波となり沖へ帰るものとしている。この水位の変動は波高と比例関係にあり，一般に沖波の10％程度であると報告されているが，合田[33]は観測値を整理した結果，サーフビートの振幅を表わす実験式として式(2-10) で表わす ζ^* を標準偏差とする正規確率分布をするものとした。

$$\zeta^* = 0.01\{H/L_0\cdot(1+h/H_0)\}^{-1/2} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}10)$$

この計算モデルでも同じ方法を用い，水位分布を8区分に分け，その出現率を与えて計算した。

一方，wave set-up は前述の式(2-7)により求めたが，この理論を不規則波に適用する場合，規則波の波をエネルギー換算波高（$H^*=0.707H_0$）に置き換えて計算した。

(3) 波高の分布と代表波高の計算

本計算モデルでは水深が $0.5L_0$ の地点における条件として沖波の波高分布を式(2-11)で示される Rayleigh 分布として与えた。すなわち，平均波高の3倍の範囲を30区間に分けて，それぞれの区間の平均値と出現率を計算し，区間波高ごとの波高変化を求めた。

$$P(X)=\frac{\pi}{2}\cdot X\cdot \exp\left(-\frac{\pi}{4}X^2\right) \qquad \cdots\cdots(2\text{-}11)$$

ただし，

$$X=\frac{H}{\bar{H}}=\frac{H}{H_0/1.60}$$

一方，計算後の波高分布を求めるために水深ステップごとに，区間幅 $0.04H_0$ の区間帯100個を設け，この区間帯ごとに波高の出現率を累加して区間出現率を求めた。さらに，この出現率から各水深ごとに密度分布を $0.25\bar{H}$ 区間ごとに計算した。

また，代表波高の計算は前述の波高の区間帯出現率より波高の大きい方から全波数の，$^1/_{100}$，$^1/_{10}$，$^1/_3$および全体の出現率を取り出して，その平均波高を計算し，それぞれ，$H_{\max}$，$H_{1/10}$，$H_{1/3}$ および $\bar{H}$ とした。

2.2.5 計算結果とその検討

(1) 平均水位

平均水位の水深による変化の例を図2-11に示す。水位変化は波高 H^* との比で表わされている。平均水位は浅くなるにつれていったん低下するが，この下降部分では海底勾配に関係せず沖波波形勾配のみによって決まる。この平均水位の最低値は規則波の場合と同じ傾向を示すが，その大きさは規則波の8割程度である。

wave set-up は海底勾配が小さい程深い位置から始まり，その上昇カーブは波形勾配ごとにほぼ相似となる。

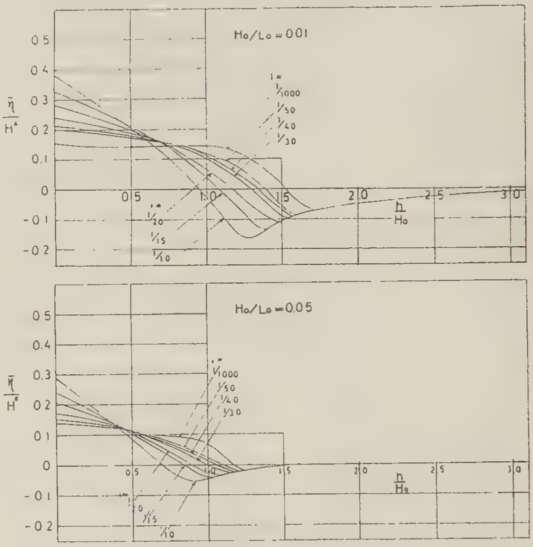


図 2-11 不規則波の平均水位変化

Variation of computed mean sea level due to water depth change at irregular wave

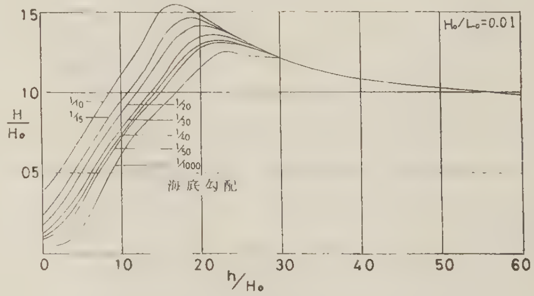
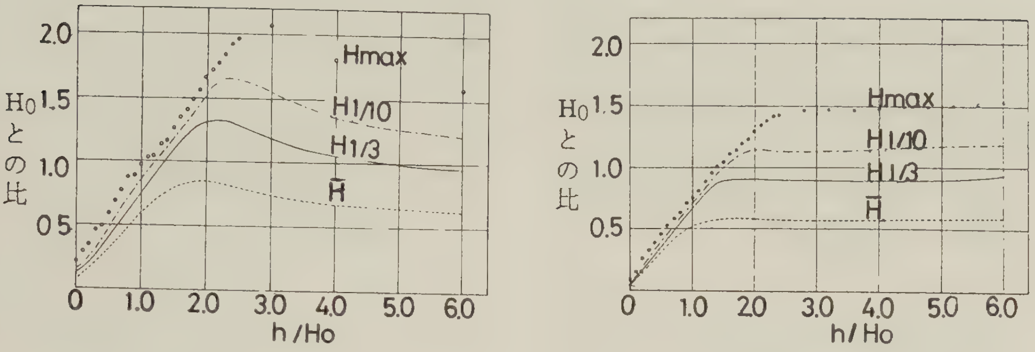


図 2-12 有義波高の水深変化（$H_0/L_0=0.01$）

Variation of computed efficient wave height due to water depth change



a.　Ho/Lo = 0.01　　b.　Ho/Lo = 0.05

図 2-13　H_{max}, $H_{1/10}$, $\bar{H}$の水深変化（海底勾配$^{1}/_{30}$）
Variation fo H_{max}, $H_{1/10}$ and $\bar{H}$ due to water depth change (bottom slope 1 : 30)

この最大値は汀線において現れるが，その大きさは，規則波の¾程度となっている。

(2)　代表波高

有義波高の変化は波群の中で砕波が生じるまでは海底勾配には影響されない。すなわち，極浅水域では h/L と波形勾配によって変化する。そして，波高が大きいものから順次砕波し，有義波高曲線は次第に下降する。また，ピーク付近では浅い水深まで砕波しない場合ほど波高の増大は大きい。この状況を図2-12に示す。

ピーク波高の大きさ $(H_{1/3})$ peak/H_0 は，海底勾配が急な程，並びに波形勾配が小さい程，大きい増大率を示す。

$^{1}/_{100}$最大波高 H_{max}，$^{1}/_{10}$最大波高$H_{1/10}$，有義波高$H_{1/3}$，平均波高$\bar{H}$それぞれの H_0（沖波有義波高）との比が水深によりどう変化するかを図2-13に示す。H_{max} 及び $H_{1/10}$ のピーク時水深は当然$H_{1/3}$のピーク水深より深い位置に現われ$\bar{H}$は浅い位置に現われている。

従って，H_{max} のピーク地点で $H_{max}/H_{1/3}$ は極大となるが，その後は減少し，水深が沖波波高と同程度の付近からまたその比が増大する傾向を示す。h/H_0 の 2 から 1 にかけて$H_{max}/H_{1/3}$の値が低下する傾向については，図2-14中○×印で示しているように現地波浪観測結果[34)35)]からも確認されている。

(3)　砕波率

その水深で全体の波数の何％の波がすでに砕波したかを砕波率と呼ぶことにし，その状況を図2-15に示す。平均的に，砕波は $h/H_0=3$ 程度から始まり，沖波波高の 2 倍の水深では 0 ～15％（$i={}^{1}/_{30}$, $H_0/L_0=0.03$ では 3 ％）が砕波する。沖波と同程度の深さでは25～65％（同44％）となっている。そして汀線（$h/H_0=0$）ではほとんど全部が砕波している。

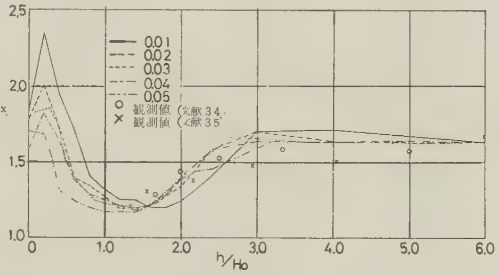
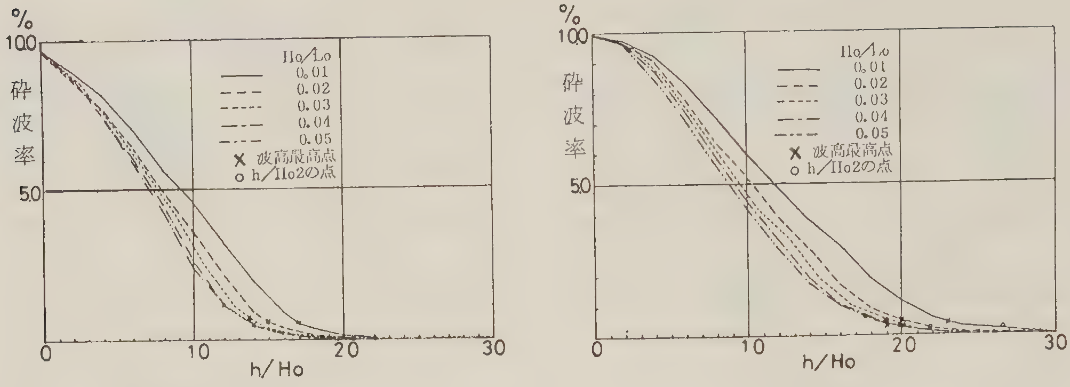


図 2-14　$H_{max}/H_{1/3}$の水深変化（海底勾配$^{1}/_{50}$）
Varition of $H_{max}/H_{1/3}$ due to water depth change (bottom slope 1 : 50)

この曲線の傾向として，海底勾配が小さい程，また沖波波形勾配が小さい程，砕波は，h/H_0 の大きいところから始まり，同じ h/H_0 でも砕波率は高くなっている。

同図において有義波高がピークを示す h/H_0 での各砕波率を×印で記入してある。この値は砕波率10％以下で平均 5 ％程度となっている。すなわち，5 ％の波が砕波した近傍において有義波高は最大となることを示している。

一方，漁港構造物標準設計法[36)]では $h=2H$ において直立壁に作用する波圧の算定式が重複波圧と砕波圧とに分れているが，この地点における砕波率を計算すると図2-16のようになる。すなわち，海底勾配が緩かである程，また波形勾配が大である程砕波率は増大し，波の不規則性を考えると，条件により $2H$ 以上の深さでも数％の波が砕波していることを示している。このうち防波堤など



a　海底勾配 1/10　　　b　海底勾配 1/50

図 2-15　砕　波　率

Breaking ratio（a：bottom slope 1：10, b：bottom slope 1：50）

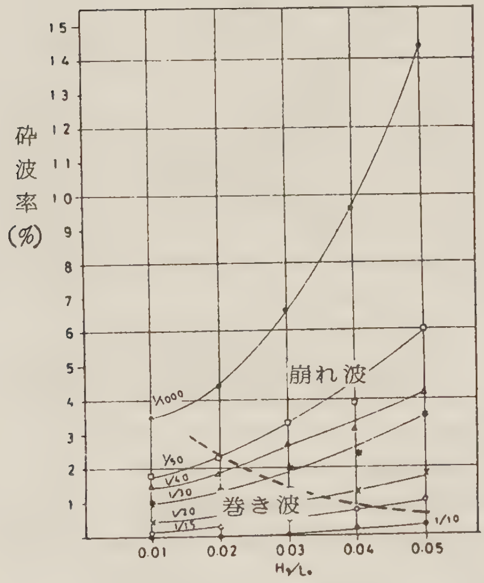


図 2-16　h＝2H地点の砕波率

Breaking ratio at h＝2H

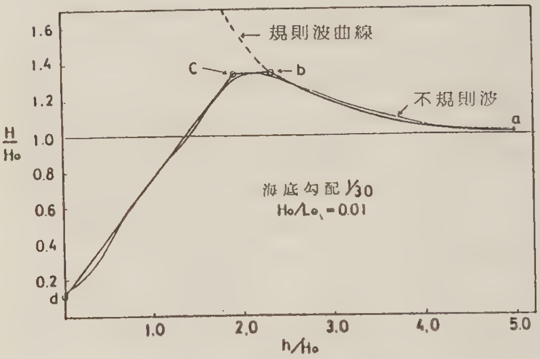


図 2-17　波高計算の単純化

Deffinition of point a, b, c and d

の構造物に衝撃的砕波が発生するのは巻き波時である。

2.2.6　不規則波高の設計への適用

不規則波の波高変化を設計に利用するため単純化する場合，図2-17に示すように3つの区間に分けて計算する方法でほぼ近似できる。第1区間は沖から最高点までの波高増大区間（a点からb点），第2区間は最高値で一定波高の区間（b点からc点），第3区間は砕波後で波高が減少する区間（c点からd点）とする。

第1区間の波高変化としては，前記の2-2-2規則波の計算モデルにおいて示した式（2-1），（2-2-b），（2-2′）が適当であろう。ただし，全水深の中に含まれる wave set-down 量は微小なので無視することができる。

第2区間の波高をc点の水深と共に図2-18に示す。この波高と第1区間の曲線との交点がb点である。

第3区間はこのc点から図2-19に示す汀線上の波高（d点）を結ぶ直線で示されている。この直線の勾配は主に海底勾配に支配され，波形勾配の影響は小さく，その範囲はほぼ，0.55から0.75の間の値をとり，従来の砕波後の波高の式の勾配（$H/h=0.78$）より小さくなった。

上記の方法で波高変化に適合度が高い近似式を検討した結果，以下の式を得た。

(1)　$H_{1/3}$の波高変化の近似式

a．波高増大部（a～b点）の波高変化

$H_{1/3}$の波高の似近式は単一波の波高変化と同一とす

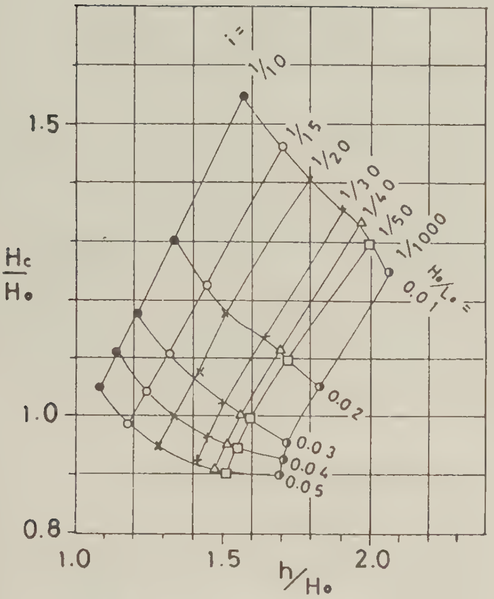


図 2 18　c 点の波高と位置
Wave height and water depth at point c

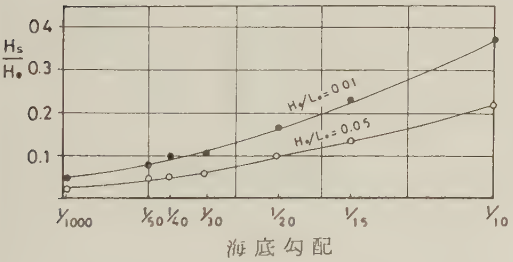


図 2-19　汀線上の波高
Wave height at point d（$h=0$）

る。すなわち，式（2-1）～（2-2′）で表わす。

b．最高部（b～c 点）の波高

$$\frac{H_{1/3}}{H_0}=0.40(2.2i+1.0)\cdot\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.247} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}12)$$

ただし最小値0.92

c．砕波後の減衰部（c～d 点）の波高変化

$$\frac{H_{1/3}}{H_0}=1.7(i+0.03)^{1.5}\cdot\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.33}+\left[1.5\,i+0.62+(25\,i-2.0)\frac{H_0}{L_0}\right]\frac{h}{H_0} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}13)$$

ただし，$H_{1/3}$　：水深 h 地点の有義波高
H_0　：沖波有義波高

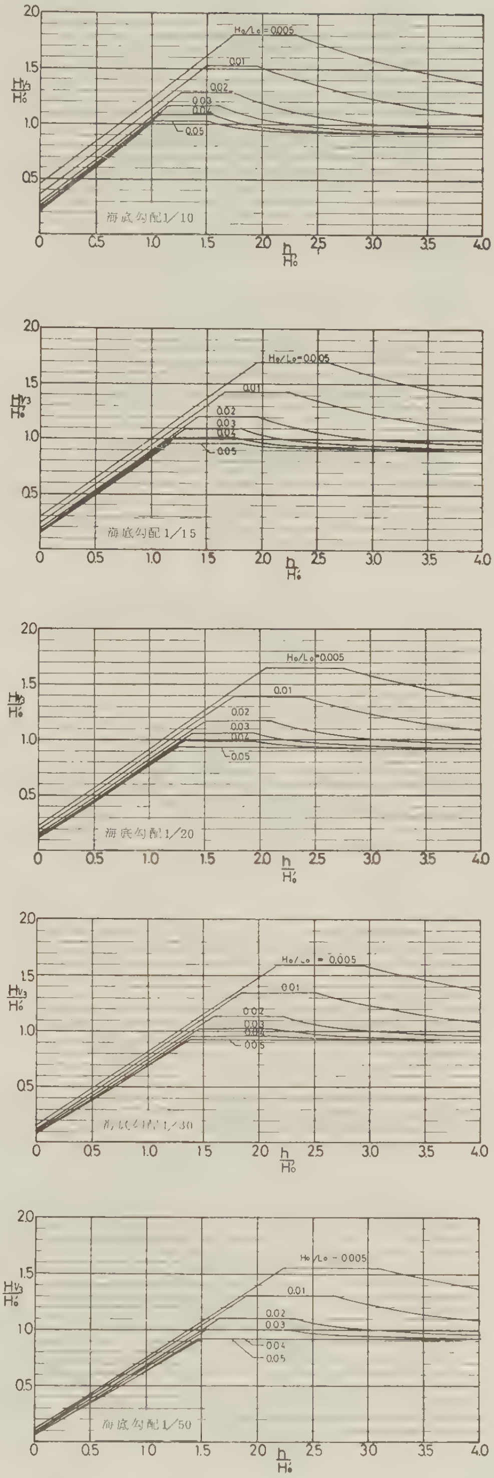


図 2-20　砕波点付近の波高算定図（有義波高）
Estimated wave height near the shore（$H_{1/3}$）

L_0　　：沖波有義波長

i　　：海底勾配

これを図示すると図2-20のようになる。

(2)　$H_{\max}$ の波高変化の近似式

a．波高増大部（a～b点）の波高変化

沖波最大波高（$H_{\max}$）$_0$ の単一波の波高変化と同一とする。

b．最高部（b～c点）の波高

$$\frac{H_{\max}}{H_0}=0.64(2.0i+1.0)\cdot\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.25} \quad \cdots\cdots(2\text{-}14)$$

ただし，最小1.50

c．砕波後の減衰部（c～d点）の波高変化

$$\frac{H_{\max}}{H_0}=1.9i+0.06+(0.015i+0.0005)\cdot\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1.0}+\left[2.4i+0.68+(20i-4.0)\frac{H_0}{L_0}\right]\cdot\frac{h}{H_0} \quad \cdots\cdots(2\ 15)$$

ただし，$H_{\max}$：水深 h 地点の最大$^1/_{100}$波高

H_0　：沖波有義波高

この値を図示したものが図2-21である。

2.2.7　まとめ

本節で述べた規則波の浅水変形の計算モデルについては，直接実証するには至っていないが，実用的範囲ではほぼ妥当なものと考えられる。

砕波後の Wave set-up については，直線的に変化するという，Higgins ら[37]，三井ら[38]，佐伯ら[39]，の研究と異った変化をしていること，および平均水位が低下することについては実証されておらず，今後の研究に待たねばならない。

計算結果は紙面の制約上一部のケースしか掲載できなかったが，詳しくは文献[40],[41]に報告している。

以下にこの計算結果から得られた結論を要約すると，

① 平均水位の低下傾向は波形勾配のみによって決まりその大きさは一般に小さい。また，砕波後のセットアップは海底勾配の影響を強くうけ H_0/L_0 が変っても同じ上昇傾向を示す。汀線の平均水位上昇率（$\bar{\eta}/H^*$）は海底勾配が大きく波形勾配が小さい程，大きくなる。

② 有義波高は沖から岸に向うに従い，初期は規則波とほぼ同じ高さであるが，ピーク付近では規則波より小さくなる。砕波後の波高減少は直線的であり海底勾配の影響が強く現れている。さらに汀線付近の波高は，海底勾配が急な場合（$i={}^1/_{10}$）は沖波波高の3～4割にも達する。

2.3　港口よりの回折波

2.3.1　港口形状の現況

港口部の防波堤配置について検討する場合，港内の静穏度を確保することが第一であるが，それがために，漁船の出入港に支障をきたすものであってはならないことは言うに及ばない。漁港は一般にはどのような港口形状であるか，やや古い資料であるが第4次（昭和44～48年度）および第5次（昭和48～52年度）漁港整備計画の平面計画図（修築事業分）を基に，港口部の形状，特に港口幅員B，防波堤交叉角α，堤頭間距離D，水深について調査した。

そのうち，一対の主防波堤，副防波堤からなる港口形状のものを菅原ら[42]が整理したものが図2-22～2-24である。この港口形状のものは調査漁港中の約70％を占めていた。

これによると，港口幅員Bの頻度は50～60mにモード

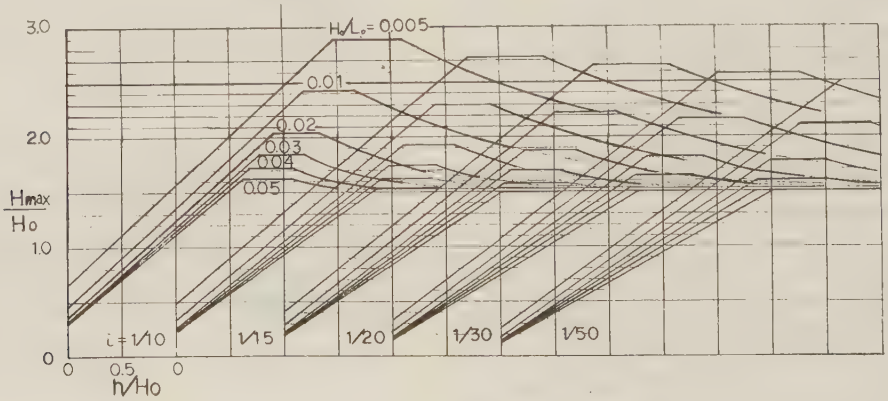


図 2-21　砕波点付近の波高算定図（最大波高）

Estimated wave height near the shore（$H_{\max}$）

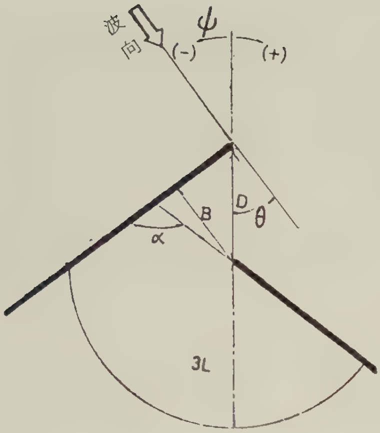


図 2-22　港口形状記号説明図
Deffinition sketch of a port entrance

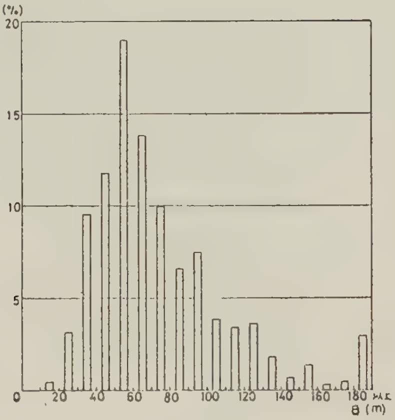


図 2-24　港口幅員（B）の頻度図
Histgram in the rank of port entrance width(B)

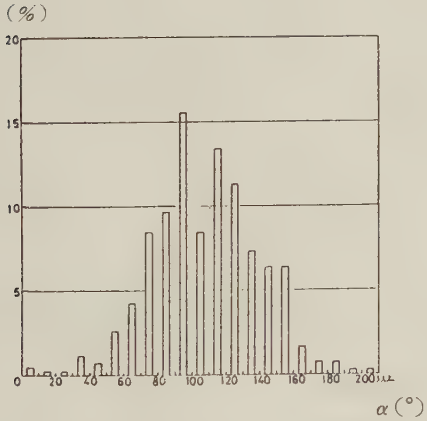


図 2-23　防波堤交叉角（α）の頻度図
Histgram in the rank of intersection angle between main breakwater and sub one

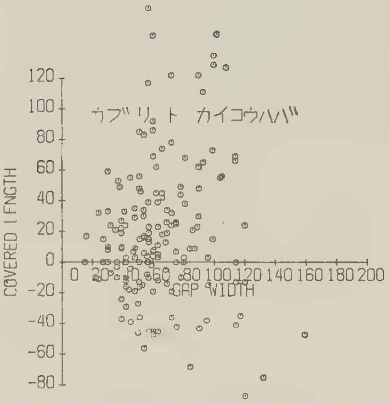


図 2-25　防波堤の覆りと開口幅
Relationships between covered length and gap width（B）

が現れている。防波堤交叉角αは，70°～150°の範囲が多い。

図2-25は著者が整理し直したものであり，外側の防波堤が波向に直角に出ていると仮定すれば，内側防波堤先端よりとび出した長さが覆りとなる。すなわち，漁港では港口幅が比較的狭く，覆りのある防波堤配置が多いことが特徴である。

2.3.2　回折波の計算方法

防波堤の影に位置する泊地の波高を計算する方法として，

① 回折理論を適用する方法
② 数値模型実験による方法
③ 水理模型実験による方法

などがあるが，もし，①の方法が適用できるなら最も簡便である。以下に回折理論について若干述べる。

各種の防波堤配置に対して回折係数を推算する場合，a)～d)に示すような4つのタイプに分類することができる。

a）半無限堤の回折
b）開口部よりの回折
c）島堤の回折
d）二重回折

このうちa)の場合が基礎となるものであり，これについてPenny & Price[13]はSommerfeltの光の回折理論を水の波の回折に応用し，半無限堤からの回折波計算を行った。さらに，その半無限堤からの回折を重ね合わ

せることにより，二本の防波堤開口部からの回折計算，すなわち，b)の場合の計算を行っている。この理論については，二本の防波堤が一直線上にあり，波浪が直角方向から浸入してくる規則波の実験でその妥当性が確められている。また，c)の島堤の回折についても，合田ら[43]によって，やはり島堤両端からの回折波を重ね合わせることにより，回折図まで求められている。しかし，d)についての一般化した報告は見当たらない。著者は，漁港においてはd)の場合が多いことにかんがみ，この算定を行うための計算法を求め，併せて行った水理模型実験と比較して，その解の妥当な範囲を検討した。

ここではまず，回折理論の基本となる半無限堤の計算方法について述べる。

(1)　半無限堤の回折波の解析解

回折波の速度ポテンシャルΦを次のような仮定のもとに式(2-16)のように与える。

① 波は微小振幅波である。
② 防波堤は直立剛体で波を完全反射する。
③ 防波堤は半無限直線堤である。

$$\Phi = Ae^{ikrt}\cdot\cosh k(z+d)\cdot F(r,\theta) \qquad \cdots\cdots(2\text{-}16)$$

$k=2\pi/L$，$C=L/T$（波速）
d＝水深
r＝防波堤先端からの距離
θ＝防波堤からの角度
θ_0＝波の入射角

ここで，$F(r,\theta)$ は次のように与えられる。

$$F(r,\theta)=\frac{1}{\sqrt{2}}e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)+\frac{\pi}{4}i}\int_{-\infty}^{u}e^{-i\pi w^2/2}dw$$
$$+\frac{1}{\sqrt{2}}e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)+\frac{\pi}{4}i}\int_{-\infty}^{u}e^{-i\pi w^2/2}dw \qquad \cdots\cdots(2\text{-}17)$$

$$\left.\begin{aligned} u&=\left|2\cdot\sqrt{k_r/\pi}\cdot\sin\frac{\theta-\theta_0}{2}\right| \\ u'&=\left|-2\cdot\sqrt{k_r/\pi}\cdot\sin\frac{\theta+\theta_0}{2}\right| \end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}18)$$

波動の水位を η とし，重力加速度を g とすると，微小振幅波であるとの条件から，次式が成立する。

$$g\eta=\frac{\partial\Phi}{\partial t} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}19)$$

よって式(2-19)を(2-16)へ代入すると

$$\eta=\frac{A_iK_c}{g}\cdot e^{ikct}\cdot\cosh k(z+d)\cdot F(r,\theta) \qquad \cdots\cdots(2\text{-}20)$$

回折する前の波は次式で与えられる。

$$\eta_0=\frac{A_iK_c}{g}e^{ikct}\cosh k(z+d) \qquad \cdots\cdots(2\text{-}21)$$

式(2-20)，(2-21)から波高比すなわち回折係数 K_d は水深変化がないとすると式(2-22)となる。

$$K_d=\mathrm{mod}[F(r,\theta)] \qquad \cdots\cdots(2\text{-}22)$$

また位相 ε は，式(2-23)となる。

$$\varepsilon=\arg[F(r,o)] \qquad \cdots\cdots(2\text{-}23)$$

ここで式(2-17)において，$f(u)$ なる関数を次のように定義する。（$u\geqq 0$）

$$f(u)=\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\pi/4}\int_{-\infty}^{u}e^{-i\pi w^2/2}dw$$
$$=\frac{1}{2}[1+C(u)+S(u)+i\{C(u)-S(u)\}] \qquad \cdots\cdots(2\text{-}24)$$

$$f(-u)=\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\pi/4}\int_{-\infty}^{-u}e^{-\pi w^2/2}dw$$
$$=\frac{1}{2}[1-C(u)-S(u)+i\{C(u)-S(u)\}] \qquad \cdots\cdots(2\text{-}25)$$

ただし，

$$\left.\begin{aligned} C(u)&=\int_0^u\cos\frac{\pi}{2}w^2dw \\ S(u)&=\int_0^u\sin\frac{\pi}{2}w^2dw \end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}26)$$

式(2-17)における u，u' の符号は図2-26のようになり，それぞれの領域の $F(r,\theta)$ は以下の式のようになる。

回折波領域

$$F(r,\theta)=f(-u)e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}$$
$$+f(u')e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}27)$$

入射波領域

$$F(r,\theta)=f(u)e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}$$
$$+f(-u)e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)}$$
$$=e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}-f(-u)e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}$$
$$+f(u')e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}28)$$

反射波領域

$$F(r,\theta)=f(u)e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}$$
$$+f(u')e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)}$$
$$=e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}+e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)}$$
$$-\{f(-u)e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}$$
$$+f(-u')e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}29)$$

式(2-28)，(2-29)において

$e^{-ikr\cos(\theta-\theta_0)}$ は入射波を
$e^{-ikr\cos(\theta+\theta_0)}$ は反射波を

それぞれ表わしている。

2.3.3　二重回折計算

二つの防波堤が波の進行方向に対して重なっている場合は二重回折が起こる。

図2-27のように領域Aと領域Bに分ける。防波堤IIにおいては，防波堤Iで回折した波が再び回折をする。ここで防波堤IIへ入射する波を防波堤IIの先端における防波堤Iからの回折波高とし，入射方向を防波堤IとIIを結んだ方向とする。ここでも防波堤Iに関する変数を添字1，防波堤IIに関する数値を添字2で表わし，防波堤Iから回折する波の防波堤IIの先端の回折係数を K_d，とする。u_1，u_1'，u_2，u_2' の記号は図2-27のとおりである。B領域においては，防波堤Iでの回折波が重複しないよう，入射波と仮定したものを差し引かねばならない。

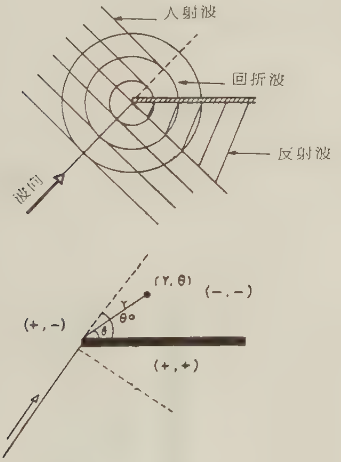


図 2-26　半無限防波堤による回折

Definition sketch for wave diffraction due to a semi-infinite breakwater

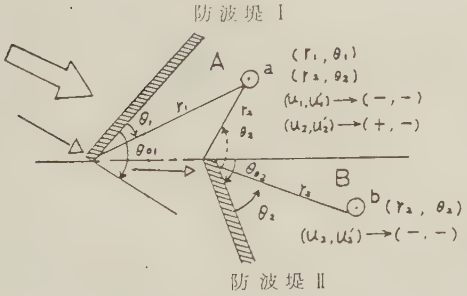


図 2-27　二重回折

Definition sketch for double wave diffraction

B領域（b点）

$$F(r,\theta)=K_{d2}\{f(-u_2)e^{-ikr_2\cos(\theta 2-\theta 02)}+f(u_2')e^{-ikr_2\cos(\theta 2+\theta 02)}\} \quad \cdots\cdots(2\text{-}30)$$

A領域（a点）

$$\begin{aligned}F(r,\theta)&=F(r_1,\theta_1)+K_{d2}\cdot F(r_2,\theta_2)\\&=f(-u_1)e^{-ikr_1\cos(\theta 1-\theta 1)}\\&\quad+f(-u_1')e^{-ikr_1\cos(\theta 1+\theta 01)}\\&\quad+K_{d2}\{f(u_2)e^{-ikr_2\cos(\theta 2-\theta 02)+\varepsilon_3}\\&\quad+f(-u_2')e^{-ir_2\cos(\theta 2+\theta 02)+\varepsilon_3}\\&\quad-e^{-ikr_2\cos(\theta 2-\theta 02)+\varepsilon_3}\}\\&=f(-u_1)e^{-ikr_1\cos(\theta 1-\theta 01)}\\&\quad+f(-u_1')e^{-ikr_1\cos(\theta 1+\theta 01)}\\&\quad+K_{d2}\{f(-u_2)e^{-ikr_2\cos(\theta 2+\theta 02)+\varepsilon_3}\\&\quad+f(-u_2')e^{-ikr_2\cos(\theta 2-\theta 02)+\varepsilon_3}\}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(2\text{-}31)$$

回折係数は式(2-22)で求められる。

2.3.4　回折率についての水理模型実験

半無限堤先端や二本の一直線に並んだ防波堤開口部からの回折波については理論解が適用できることが実験的にも確かめられている。そこで前述の二本の防波堤が一直線上にない場合について系統的に実験を行い，防波堤配置の違いによる回折波の性状を調べると共にSommerfeldの解の重ね合わせ方法が妥当であったかどうか検討した。

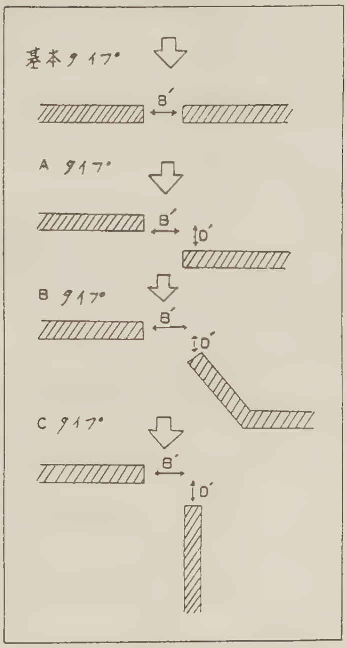


図 2-28　防波堤配置のタイプ分け

Classification fo breakwater's arrangements

表 2-1 実験ケース一覧

List of test cases

実験番号			防波堤のずれ	開口幅	水深	周期	波長
タイプ			(D′)	(B)	(h)	(T)	(L)
A	B	C	cm	cm	cm	sec	cm
A-1-1	B-1-1	C-1-1	50.0	100.0	12.0	1.0	100.0
A-1-2	B-1-2	C-1-2		50.0			
A-1-3	B-1-3	C-1-3		0.0			
A-1-4	B-1-4	C-1-4		− 50.0			
A-2-1	B-2-1	C-2-1	100.0	100.0			
A-2-2	B-2-2	C-2-2		50.0			
A-2-3	B-2-3	C-2-3		0.0			
A-2-4	B-2-4	C-2-4		− 50.0			
A-2-5	B-2-5	C-2-5		−100.0			
A-3-1	B-3-1	C-3-1	150.0	100.0			
A-3-2	B-3-2	C-3-2		50.0			
A-3-3	B-3-3	C-3-3		0.0			
A-3-4	B-3-4	C-3-4		− 50.0			
A-3-5	B-3-5	C-3-5		−100.0			
A-3-6	B-3-6	C-3-6		−150.0			
A-4-1	B-4-1	C-4-1	200.0	100.0			
A-4-2	B-4-2	C-4-2		50.0			
A-4-3	B-4-3	C-4-3		0.0			
A-4-4	B-4-4	C-4-4		− 50.0			
A-4-5	B-4-5	C-4-5		−100.0			
A-4-6	B-4-6	C-4-6		−150.0			
A-4-7	B-4-7	C-4-7		−200.0			

＊開口幅の欄で(－)表示は内防波堤に外防波堤が被っている場合を表わす。

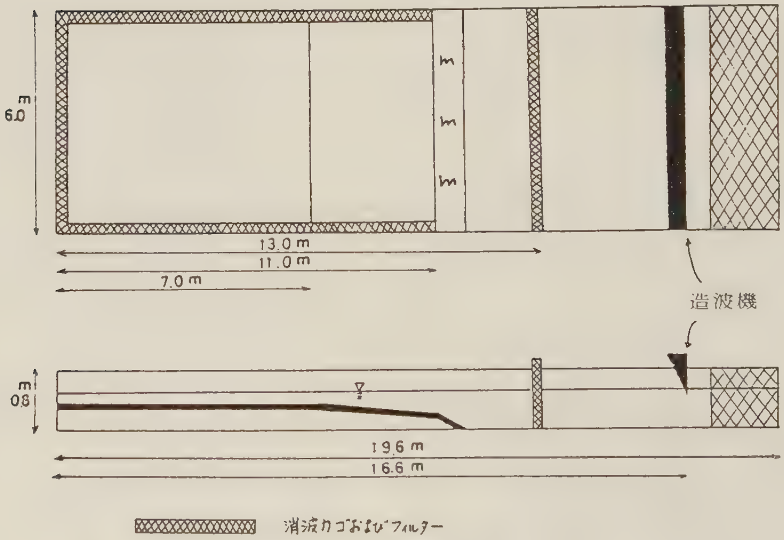


図 2-29 平面実験水槽

A plane wave tank

実験ケースは図2-28の４つの配置タイプに大別した。基本タイプは港口幅を変えると共に水深も変えた実験を行った。Ａ，Ｂ，Ｃタイプについては港口幅と共に外防波堤と内防波堤のずれを変えて実験を行った。これらの実験ケースは表2-1の通りである。

実験に用いた水槽は長さ20m，幅6.5m，高さ0.8mであり，図2-29に示すように，水槽の中間部に斜面を設け嵩上げし，後半部は平坦なモルタル床としている。造波装置にはプランジャー型の規則波造波機を用いた。又，反射を防ぐために造波機の背後，模型床の周囲３辺及び造波機の前方に消波カゴを設置した。模型防波堤は幅10cm×高さ20cm×長さ40cmの直方体コンクリート

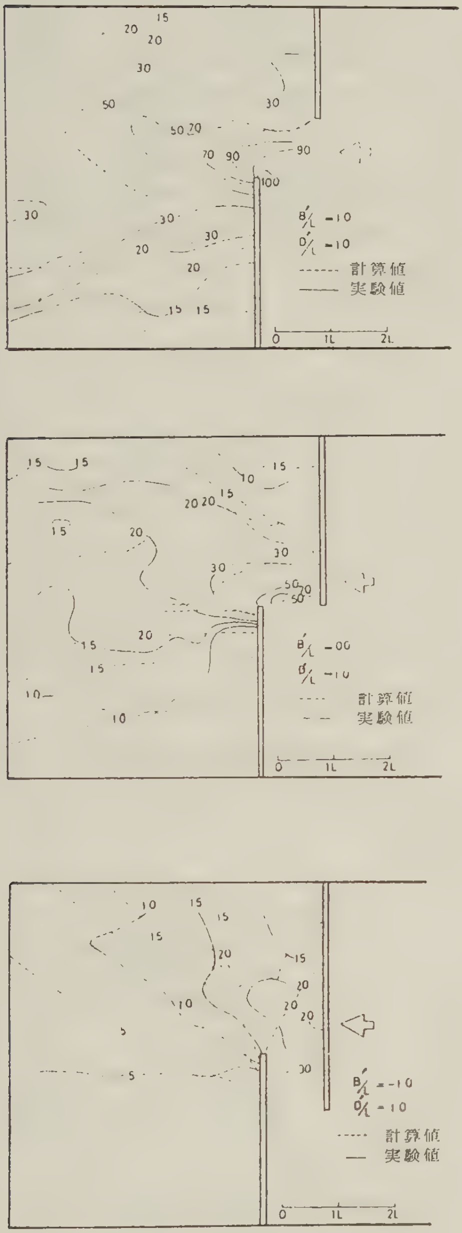

B'/L = 1.0
D'/L = 1.0
B'/L = 0.0
D'/L = 1.0
B'/L = -1.0
D'/L = 1.0
------ 計算値
—— 実験値
0
1L
2L

図 2-30　Ａタイプの平面的比較

Diffraction diagram in type A(dots: calculation, lines: experiment)

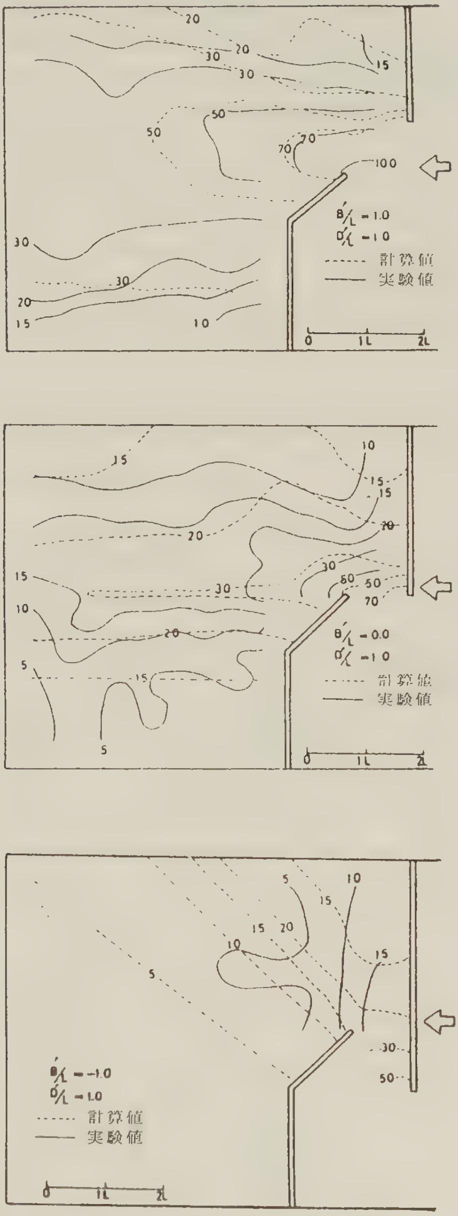

B'/L = 1.0
D'/L = 1.0
B'/L = 0.0
D'/L = 1.0
B'/L = -1.0
D'/L = 1.0
------ 計算値
—— 実験値
0
1L
2L

図 2-31　Ｂタイプの平面的比較

Diffraction diagram in type B(dots: calculation, lines: experiment)

ブロックを堤体として造った。波の諸元は，周期1.0sec，波高は2.5～3.5cmの進行波とし，水深12cmの水平床上では波長は100cmとなる。

入射波の波高は，防波堤からの反射波が入らない様に防波堤を置く以前に測定しておき，港口部に位置する4点の平均を採用した。港内波高は，観測台車上に容量式波高計の検出器を取付け移動観測し，移動距離が半波長即ち50cm毎に波高を平均して算出した。さらに，進行波高で除して回折率を求め，平面図に落として等回折率線図（回折図）を作成した。

2.3.5　結果と考察

基本タイプについては解析解と実験結果とは非常によく一致した。

A，B，Cタイプの実験結果と解析解との回折率の平面的な比較を図2-30，図2-31，および図2-32に示す。図でわかる通り，開口幅B′が正の時はA，B，C 3タイプ共に実験結果と解析解の計算値とは比較的良い一致を示している。

開口幅が0のとき，計算値には両堤頭の見通し線上に回折率の大きい値が現れているが実験値には現れない。このため，この線上の値に大きい差があらわれている。

主防波堤が被さっているA，B，Cケースはタイプ共に実験値が計算値より小さく，回折波の主方向（最も大

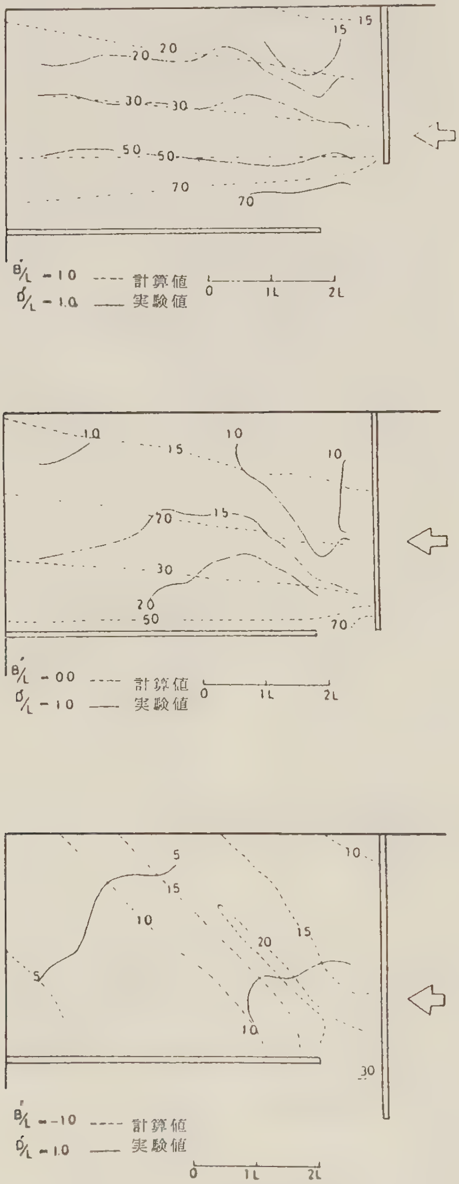

15
20
30
50
70
B′/L = 1.0　---- 計算値
D/L = 1.0　—— 実験値
0　1L　2L
10
15
20
30
50
70
B′/L = 0.0　---- 計算値
D/L = 1.0　—— 実験値
0　1L　2L
5
10
15
20
30
B′/L = -1.0　---- 計算値
D/L = 1.0　—— 実験値
0　1L　2L

図 2-32　Cタイプの平面的比較

Diffraction diagram in type C (dots : calculation, lines : experiment)

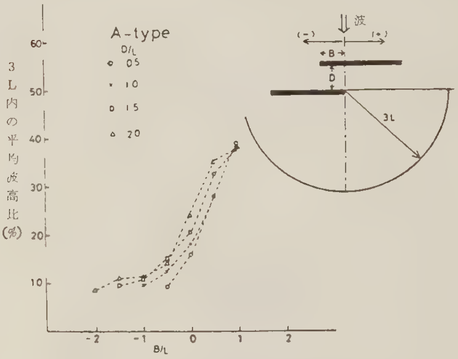


図 2-33　Aタイプ港内平均波高比

Mean wave height ratio inside of breakwaters in type A

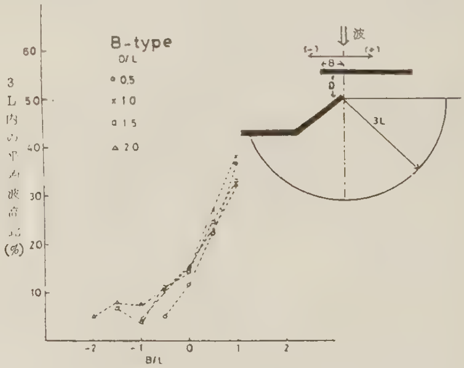


図 2-34　Bタイプ港内平均波高比

Mean wave height ratio inside of breakwaters in type B

きくなる方向）が異なることが分布形状のちがいとして現れている。

またAタイプは防波堤が被さった時に他のタイプより大きくなっているがこれは副堤前で反射した波が主堤背面で再反射し，港内へ入るためであろう。

このように，開口部が0か負の場合は実験値と解析解の計算値とはその分布形状に隔りがあり，二重回折の計算方法が適当でないことがわかった。

実験により求められた二重回折の回折図を定式化することは難しいため，とりあえず港内平均回折率（副堤先端から内側3Lの円弧内の平均値）を比較したものが図2-33～35である。

菅原ら[4)]はこのデータを基に重回帰分析を行ない，各要因を無次元化したϕ（両防波堤先端を結ぶ線が波向きとなす角度），D/L，B/L，αのうちからϕとD/Lのみを選び，

$$\log K_d = -2.01 + 0.0194\phi + 0.125 D/L \qquad \cdots\cdots (2\text{-}32)$$

という実験式を得ている。（図2-36参照）
なお，重相関係数は0.949であった。

2.4　越波による港内伝達波

2.4.1　研究概要

港内泊地の静穏度を求めるためには，港口からの回折波だけでなく，防波堤からの越波による伝達波も算定する必要がある。漁港で設計される防波堤の高さはH.W.L.上ほぼ1波高以下となっており，ある程度越波を許す天端高である。

越波による伝達についての従来の研究は，Fuchs[14)]やJeffreyら[15)]による理論的研究も数編みられるが，直立

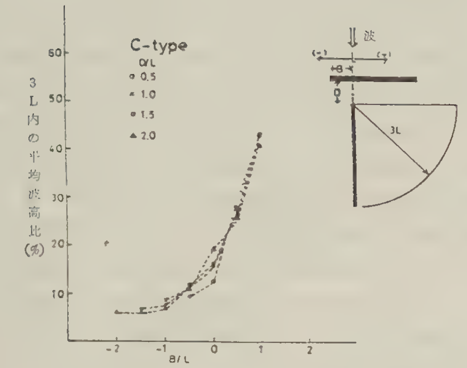


図 2-35　Cタイプ港内平均波高比
Mean wave height ratio inside of breakwaters in type C

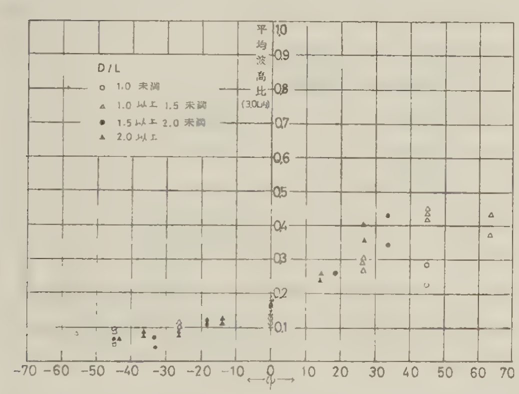


図 2-36　回折実験値の整理結果[44)]
Result of diffraction test

表 2-2　実験諸元
Experimental conditions

堤体設置水深　h	15.0（cm）				
造波地点一様水深　hd	63.2（cm）				
海底勾配　i	1/10	1/20	1/30	1/50	
周期　T(sec)	1.10	1.55	2.19	3.10	
沖波波長　L_0(m)	1.89	3.75	7.49	15.00	
水深波長比　h/L_0	0.08	0.04	0.02	0.01	
入射波高　H	iとTの各ケースについて数ケース				
堤体高　h_c(cm)	0	15	20	25	30
天端高　R(cm)	−15	0	5	10	15
天端幅　B(cm)	20				

堤に対するものが主であり，変数として天端高と波高又は水深を取り扱ったものが多い。このため，伝達率が大きい（天端高が低い）場合には適用可能であるが，実用的な防波堤ではおおよそ伝達率10%，エネルギーで1%付近を議論することになり，これに耐える理論式は見当たらない。

越波による伝達率 K_t に関係するとみられる要素としては，H：入射波高，R：静水面上の天端高，L：入射波の波長，h：堤体前面水深，B：堤幅，d：マウンド上の水深および消波工の有無とその規模など多種多様のものがあるため，その算定は非常に複雑である。

そのうち支配的要素を選んで，実験的研究により，近藤，佐藤[16]は緩い海底勾配上の混成堤の波高伝達率として $R/H \leq 1.25$ で

$$H_t/H=0.3(1.5-R/H) \qquad \cdots\cdots(2\text{-}33)$$

消波ブロック混成堤の場合は $0 \leq R/H \leq 0.75$ で

$$H_t/H=0.3(1.1-R/H) \qquad \cdots\cdots(2\text{-}34)$$

としている。ただし，H_t は伝達波高である。また，合田ら[17]は水深波長比 h/L およびマウンド水深比をパラメータとし，

$$H_t/H=0.5\left[1-\sin\frac{\pi}{2\alpha}(R/H+\beta)\right] \qquad \cdots\cdots(2\text{-}35)$$

ただし，α，β は係数である。この式は港湾の設計基準に採用されている。しかし，この実験は非砕波を主体としたものであり，砕波後の越波が多い漁港の基準として用いるには問題があると思われる。これらの式を図3-40に併記した。

2.4.2　砕波帯における越波実験

砕波の場合は海底勾配により砕波形式も変り，ひいては越波に影響されると予想されるので，この要素を加えて実験を行った。

実験施設は2次元造波水路で，幅10.1m，長さ40mの造波水槽に，幅1.00m，長さ31mの小型水路を4本設けたものである。造波水槽の一端には造波板の幅が10.0mのピストン型造波機が設置されている。また，他端及び造波板の背後には，それぞれ反射波防止のためセルロイド切削屑を詰めたかごを消波装置として設置してある。実験で使用した斜面勾配は$^1/_{10}$，$^1/_{20}$，$^1/_{30}$，$^1/_{50}$である。斜面ののり肩水平部に堤体（天端幅B＝20cm）を設置することとした。堤背後の水平床は漁港泊地という想定のもとに一様水深15cmとした。（図2-37参照）

堤体模型にはL 50cm×B 20cm×H 5 cmとL 50cm×B 20cm×H 10cmのコンクリートブロックを積み重ねたものを使用し，15cmから45cmまで4種類の高さの堤体を造った。ブロック間のすき間と水路側壁とのすき間にはスポンジを詰めて，そこからの透過波をなくした。

波の条件としては表2-2に示すように，周期を4種類波高を数種について実験を行った。

2.4.3　実験結果の概要

今回の実験をまとめると，砕波型越波の場合，次のようなことが判明した。

①　砕波型越波の場合，波高伝達率 Ht/H に最も大きな影響を与える要素は，従来の研究と同様に R/H である。

②　図2-38に示すように従来の波高伝達率の実験式は重複波型越波（白抜き印）の場合にはよく合っているが砕波型越波（黒塗り印）の場合には，従来の式よりも伝達率が大きくなる。即ち，波高は砕波点で最大となり，それ以浅では減衰するが，伝達率は砕波点以浅でも増大する。

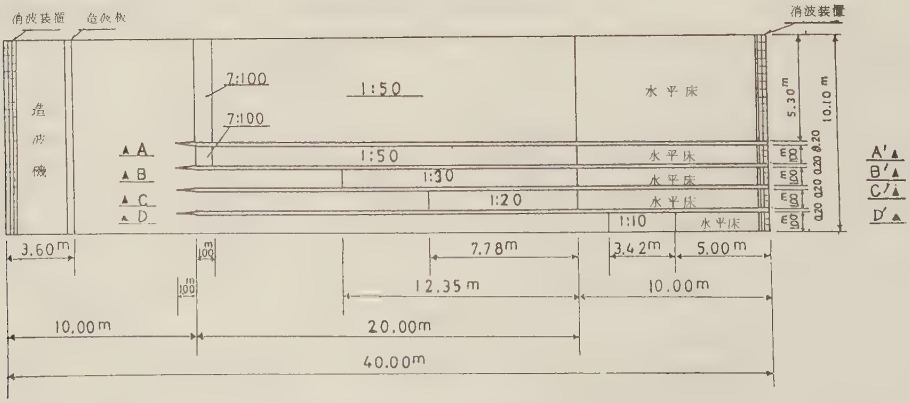

消波装置
造波板
消波装置
造波機
7:100
7:100
1:50
水平床
5.30m
10.10m
A
B
C
D
1:50
水平床
1:30
水平床
1:20
水平床
1:10
水平床
1.00m
1.00m
1.00m
1.00m
0.20
0.20
0.20
0.20
A′
B′
C′
D′
3.60m
1.00m
1.00m
7.78m
3.42m
5.00m
12.35m
10.00m
10.00m
20.00m
40.00m

図 2-37　造波水槽平面図
A wave tank use of test

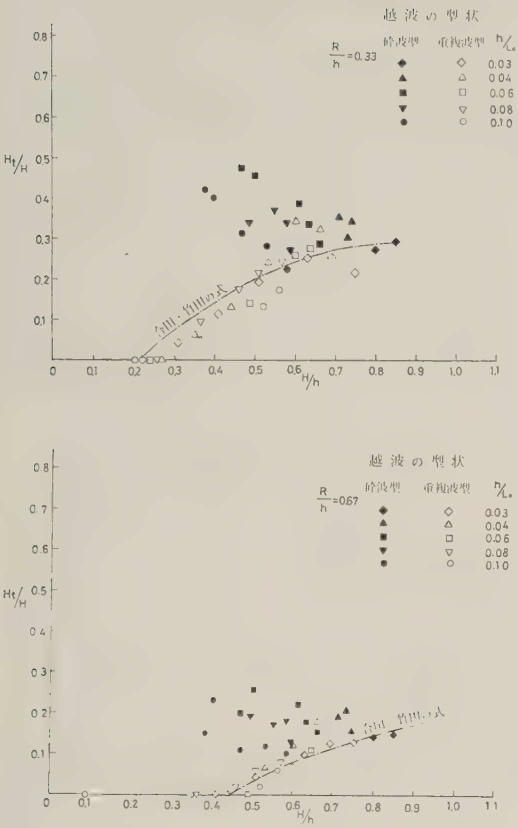


図 2-38　H/h と波高伝達率

Transmission ratio and H/h

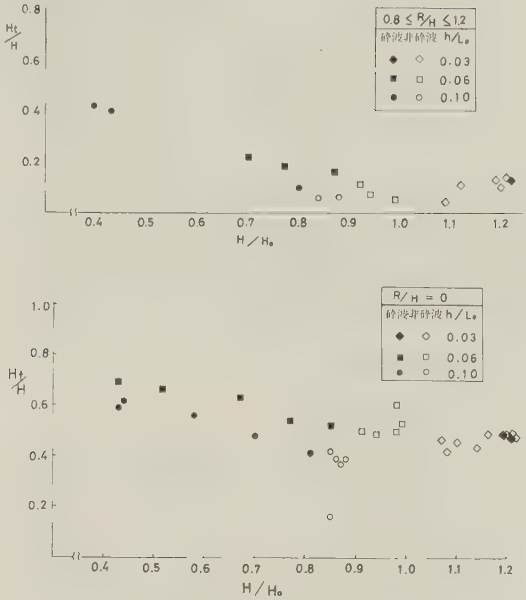


図 2-39　H/H₀と波高伝達率

Relationship between transmission ratio and H/H₀

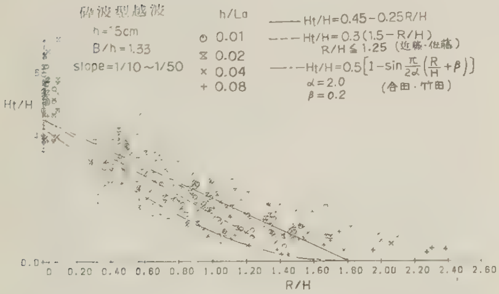


図 2-40　砕波型越波による R/H と波高伝達率

Relationship between trarsmission ratio and R/H caused by breaker's overtopping

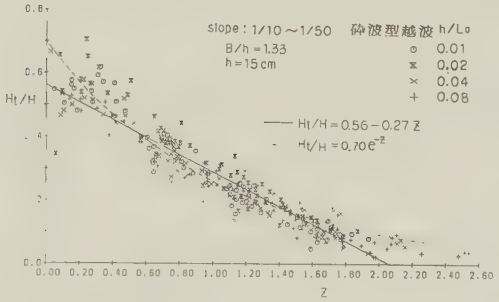


図 2-41　無次元数と波高伝達率

Relationship between transmission ratio and non dimensional alternative

③　図2-39に示すように，砕波後は波高の減衰が大きい（H/H_0 が小さい）程，伝達率は大きくなる傾向を示す。この理由は wave set-up に起因するものと推定する。

④　図2-39のパラメータ h/L_0 から，波長が長い程伝達率も大きいことがわかる。

⑤　その他の要素として，h/H_0 が関係していることが明らかになった。

⑥　砕波後の越波に関しては海底勾配が急になる程波高 H が大きくなり，かつ，伝達波高 Ht も大きくなるため結果的には，その比で表わされる伝達率は海底勾配に影響されないこともわかった。

⑦　砕波型越波において，海底勾配 $^1/_{10}$～$^1/_{50}$ の場合，波高伝達率 Ht/H は次式のように表わせる。

$$\frac{Ht}{H}=0.70e^{-z} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}36)$$

ここに，

$$z=\frac{R}{H}+\frac{1}{0.27}\left(0.30\frac{H}{H_0}+1.31\frac{h}{L_0}-0.18\frac{h}{H_0}\right) \qquad \cdots\cdots(2\text{-}37)$$

この式を実験データと共に図2 40に図示する。また，無次元数Zによる式の適合度合を図2-41に示している。なお，この重回帰式の重相関係数は0.945であり，各要素は1％の有意水準で有意であった。

2.5　漁港内の長周期波

2.5.1　長周期波の概要

著者は漁港の現地調査をする中で，防波堤はほぼ整備されていると思われる漁港でも港内がさわぐという声を全国処々の漁港利用者から聞くことが多い。この原因の中に長周期による場合が多くみられる。特に福井県越前漁港，千葉県銚子漁港，徳島県牟岐漁港等では長周期波による擾乱が原因と思われる漁船被害が発生している。長周期波の中でも漁港の静穏度を阻害するものは，周期がうねりより大きく数分から10数分程度の水位変動である。したがって，宇野木が潮位記録より解析した長周期波より周期が幾分小さく大港湾で問題になる長周期波よりも周期が短かいことが特徴である。

長周期に対する主な研究課題は，その外力となる港外長周期波の規模と発生原因および港内における共振の周期および振幅増幅率にある。著者は，これらの点を解明すべく銚子漁港の港内外において約1年間の長周期波を観測し解析を行なった。

2.5.2　沖長周期波の発生機構

沖長周期波の発生原因としてMunk[32]は1～3分の長周期波について，うねりをなす波群が海岸で砕波するために生じる現象であると説明している。その他，原因としては台風などの風および気圧変化，エッジ波，海底地震などが考えられている。しかし，これらの原因で起こる長周期波は高潮，陸棚セイシュ，津波などと呼ばれ，その周期は数十分から数時間のもので本論文のテーマ外とする。また堀川[44]は周期100秒前後の長周期重力波と呼ばれる波の発生メカニズムとして

①　（風によって起こされた）長周期波が風波とともに来襲する。

②　砕波帯内での波高が変動することによって平均水位の変動を生じ，いわゆるサーフビートの現象を起こしている。

という2つの可能性を示している。

銚子漁港での沖長周期波観測結果の概要を以下に示す。

銚子漁港の沖長周期波は，波形は港内のものより不規則であり周期も短かい。1年間の観測中最大波は昭和54年2月25日に0.70mを記録しており，約70％が0.1m以下，99％が0.4m以下となっている。その周期はゼロアップクロス法で読み取ると50～60秒にピークがあるがスペクトル図によれば110秒前後にもスペクトルのピークがある。（図2-44参照）

この長周期波の波高（H^*）および周期（T^*）について波浪との相関を求めた結果，沖長周期波高は波浪の波高（H）との相関係数は0.76，波浪の周期（T）とは0.55を示し，これらとの相関が大きいことがわかった。

さらに，$H>2$mのデータの重回帰分析により

$$H^*=0.095H+0.023T-0.26 \qquad \cdots\cdots(2\text{-}38)$$

という実験式が求められた。ただし，データ数は388個重相関係数0.86はである。

沖長周期波の周期については，HやTとの相関は小さかった。

以上の観測結果，および田子の浦港長周期波の報告より長周期波の発生機構について検討を行う。

堀川の言う①の可能性については，ⓐ長周期波の屈折図を書くとNE～SEの長波は港口付近でENE～Eと東寄りに偏向し，屈折係数は，0.9～1.1程度となり，方向による差は小さいにもかかわらず，港内長周期は波向き

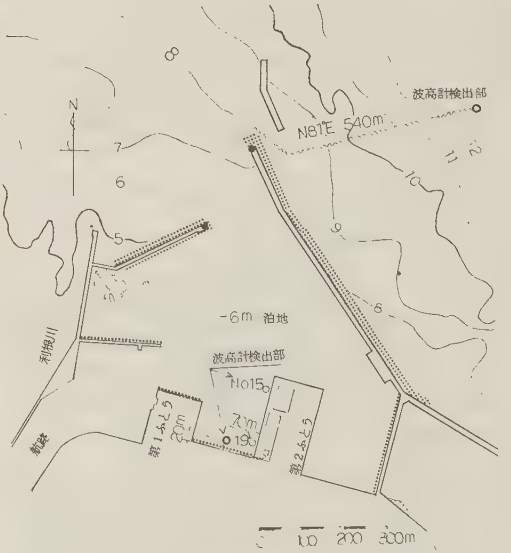


図 2-42　波高計設置位置図
Setting points of wave gages

と負の相関が現れた。ⓑ長周期波とうねりとではそのエネルギー伝達速度に開きがあり，長周期波が先に到達するはずであるが，観測値ではそれらの増大，減少がほとんど同時である（図2-34参照）。また，同時刻の田子の浦港の長周期波の記録45)は非常に小さく，台風中心から発生した同じ長周期波とは考え難い。

②の可能性については，前述のように沖波波高との相関係数が0.76と大きいこと，波浪と長周期波とが増大，減少するとき時間的ずれがないことなどから長周期波が波浪に起因することを裏付けている。さらに，波浪の周期とも正の関係が大きいことは砕波帯内のセットアップに起因する可能性を示す。ただ，長周期波の有義波周期が波浪波高と周期に弱い負の相関を示すことと波浪の方向と相関があるということは，浜でのセットアップの反射波が長周期波となって汀線に直角方向に進行する仮説とやや矛盾する。また，今回測定した110秒前後のスペクトルピークは東防波堤からの反射波の影響を受けた可能性もある。

2.5.3 港内長周期波の波高増大

長周期波の特徴として，幾何学的影の部分でも回折係数が大きいこと，また，一様に拡がること，さらに消波し難く，緩勾配でも反射することなどが挙げられる。そ

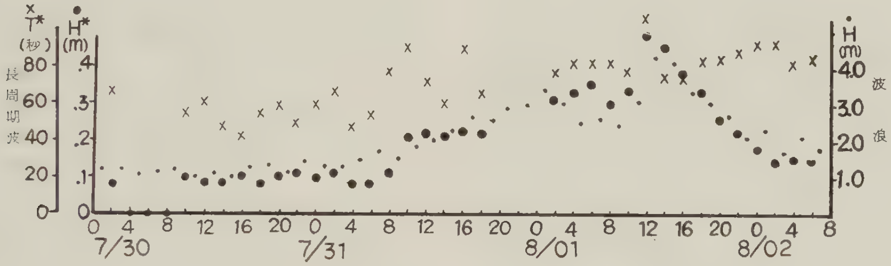


図 2-43　台風時の波高変化（7807号）

Long period wave height and short term period wave height every two hours at typhoon

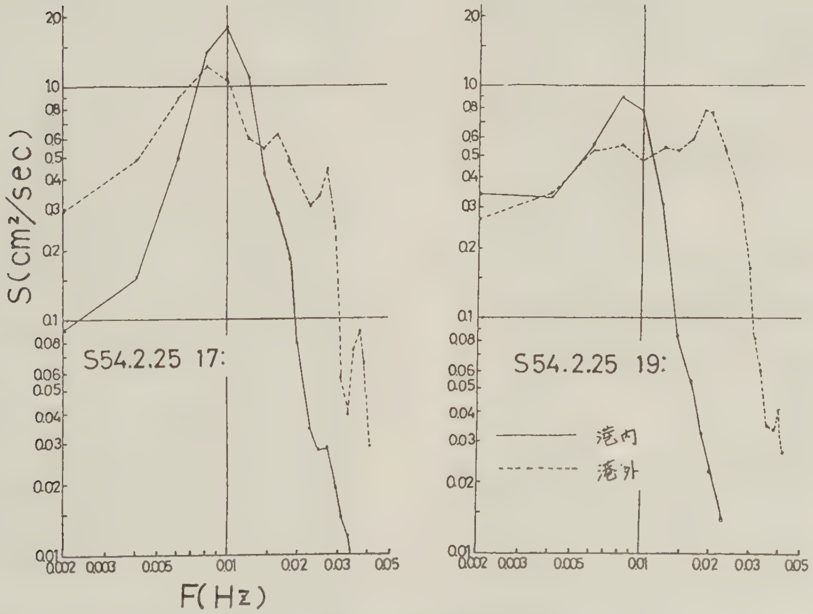


図 2-44　港内外長周期波のスペクトル例

Power spectrum of long period wave at inside and outside of the port

のため，港内に進入した長波は泊地の固有振動周期と合致すると共振する。この共振については古くから知られMiles と Munk[24]は港口幅をせばめても，必ずしもサージングは小さくならないと述べ，これをHarbor Paradox と呼んだ。しかし，Mehaute'[25]は，実際の海では Harbor Paradox は成り立たないと反論し，以下のような式を導いている。

港の共振周期Tは

$$T=\frac{l}{\sqrt{gh}}\cdot\frac{4\pi}{2n\pi+\delta} \qquad \cdots\cdots(2\text{-}39)$$

ここに

l ：港の奥行長　　g ：重力の加速度
h ：港内の水深　　n ：節の数
δ ：港口における反射による位相差

δは港口幅0のとき0となり，開放しているときは$-\pi$となる。また，共振を起こすと波高は入射波の数倍に達するとを認めた。

一般の漁港の場合は港口比が小さく，その振動系は長方形湖の共振にほぼ一致すると杉江ら[46]は述べている。

一方，種々の港形に対する共振周期は，日高[47]，西村ら[48]，Neumann[49]，Lee[50]らにより研究がなされてきたが，現実の港に適用する場合は水深や形状も複雑で推定は困難であろう。そこで著者は4章で述べる数値シミュレーションを使って港の共振周期や波高分布等を調べ，現地観測と比較した。（図2-45）

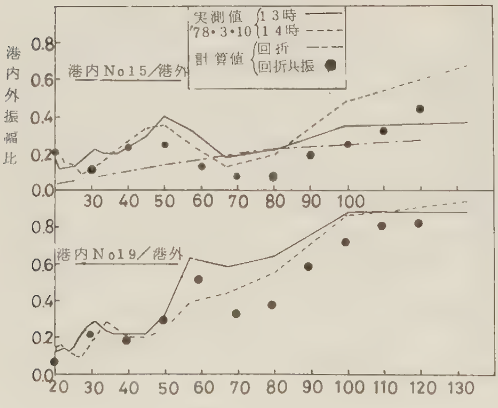


図 2-45　港内外振幅比の比較

Comparision of observaitions with calculations for wave amplitude ratio at inside and outside of the port

港の共振に関する理論式や実験式では外海の振動が同じ周期で規則的に続くものと仮定しているが，図2-46のように実際の海での長周期波周期は刻々変化し，さらに，この波形に波浪のようなノイズが含まれているため，エネルギーの消耗も大きく，共振の振幅増幅率も実験値程には大きくならないのではないかと思われる。この視点に立って，前述の銚子漁港内外の長周期波について解析した。

港内長周期波高（H_k^*）は当然ながら沖長周期波高（H^*）との相関が0.63と大きく，かつ，沖波浪波高およびその周期との相関も正の相関が大きい。波浪の波高に対しても相関があり，港口開口方向に近い程，長周期波高は大きくなる。一方，港内長周期波周期は沖長周期波周期との相関は小さく($r=-0.142$)，他の変数にもかかわりなく，110秒付近をピークとする鋭い分布形を示す（図2-47参照）。この値は前述の泊地の固有振動周期と一致している。

港内長周期波高を推算する実験式としては

$$H_k^*=0.52H^*-0.001\theta+0.15 \qquad \cdots\cdots(2\text{-}40)$$

ただし，θ ：港口開放方向(N)よりの波の偏り角度。このデータ数は183個，重相関係数は0.70であった。

代表的データをプロットして図2-48に示すが，共振の指標となる内外振幅比H_k^*/H^*はほぼ0.5から2.0間に分布しており，沖長周期波高が大きいとその比は低下する傾向を示している。このことは式(2-40)で直線式を仮定したため，0.15という大きい定数項が現れたことからもわかる。この比の大小にはH^*やθほか種々の条件が関与していると思われるが，その条件を規定することはできなかった。ただ，この振幅比のバラツキの原因の一つには港内長周期波観測波数の不足による誤差も考えられる。

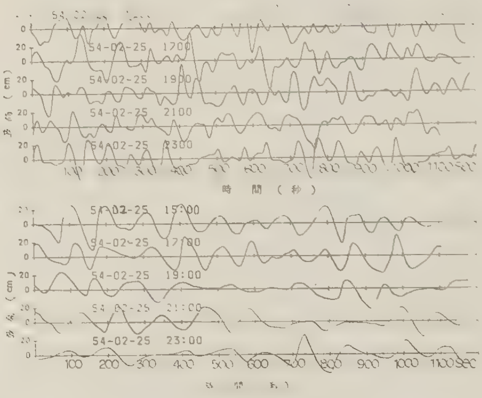


図 2-46　港内(上)と港外(下)の長周期波形

A Record of long period wave(uper : at inside of the port, lower : at outside of the port)

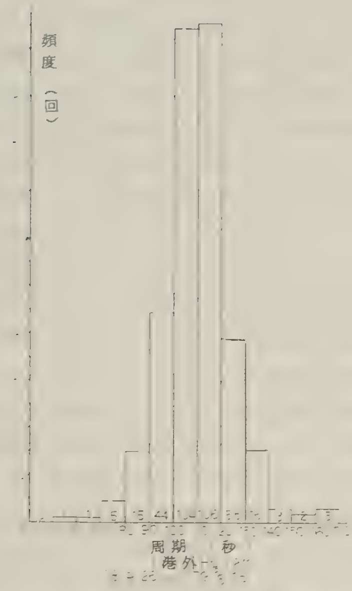


図 2-47　荒天時の港内長周期波周期分布
Distribulion of long periods at storms

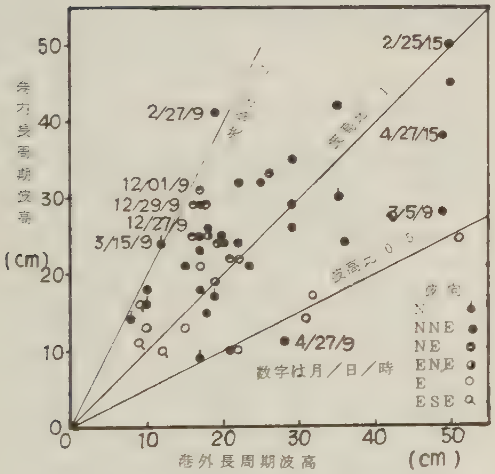


図 2-48　波向別港内外長周期波波高の比較
Comparision of long period wave's height between inside and outside of the port

3.　水理模型実験による予測法

3.1　序

水理模型実験というものは一般にかなりの時間と労力と費用を必要とするが,

1）　数種の設計に対する選択採用。
2）　計算によって解明不能な部分の現象の把握。
3）　各種想定条件の容易さ。

などのいろいろの利点を持っている。

各種の海中及び海岸構造物の建設にはそれ自身莫大な費用を要すると同時に，その多くは単独で効果を発揮するものでなく，そのいくつかが組合わさって機能を充分発揮するものである。例を漁港にとってみても，まず防波堤などの外かく施設から航路，泊地の水域施設，そして岸壁，船揚げ場等のけい留施設までが一体となってはじめて漁港としての機能を発揮することになる。そしてその各々の施設は，機能上，構造上問題がないとしても各種施設相互間の干渉や自然条件の複雑さがからみ合い理論によって，到底その最善の施設計画をうかがいしることはできない。このような問題に対しての有効な解決策を見い出す手段としては現在のところは水理模型実験が最も精度が高いであろう。以下に，水理実験の計画手順を列記する。

① 具体的問題の設定
② 現地踏査および地形データの集収（暗礁，岩礁の形状と規模，海岸線の形状，構造物断面，海図・港域深浅図等の資料）
③ 気象・海象資料の収集（風向，風速，波向，波高，周期，潮位等の資料）
④ 現地条件の設定
⑤ 予備的解析・比較港形案の一次選定（屈折図，回折図等による解析，数値モデル解析）
⑥ 実験設備の選定および模型縮尺の決定
⑦ 実験計画の策定
⑧ 模型製作
⑨ 測定機器の準備
⑩ 予備実験（消波工，導波板の設置位置の検討，実験波の検定，相似性の検討）
⑪ 本実験およびデータ処理
⑫ 実験結果の考察と港形配の比較検討
⑬ 追加実験の実施
⑭ 報告書の作成
⑮ 模型の解体

ただし，順序は平行して行うものもある。

3.2　模型の相似性について

2.3.1　相似

模型実験を行なう場合には，模型と実物とが相似でなければならないが，ここに言う相似には次の3つの種類があり，そのいずれもが2系（ここでは模型と実物）の間で相似であることが必要である。

①　形状の相似性

②　運動の相似性

③　力学的な相似性

③の力学的な相似について，実際に考えられる力には慣性力，重力，粘性力，表面張力等種々のものがあり，それらはそれぞれ異なった特性をもっているため全ての力を完全に再現することは不可能である。このうち漁港施設関係の水理模型実験に最も関係あるのが，フルードの相似律である。

1）　フルードの相似律

フルードの相似律は，対象とする水理現象において重力が支配的と考えられる場合に適用されるもので，波浪遮閉実験，防波堤等の安定についての実験などほとんどの波に関する水理実験はこの相似律によって行なわれている。

いま慣性力と重力について相似を考えると，

$$\text{慣性力}\quad F_I=M\cdot\alpha=\frac{V^2}{L}\cdot\rho L^3=\rho L^2V^2 \qquad \cdots\cdots(3\text{-}1)$$

$$\text{重　力}\quad F_G=M\cdot g=\rho L^3 g \qquad \cdots\cdots(3\text{-}2)$$

この相似律において，実物と模型の2系の間で慣性力と重力の比が等しいようにV，L，gを選ぶことが必要である。これを各物理量の縮尺比で表わせば式（3-3）となる。

$$\frac{V_r^2}{g_r L_r}=1 \qquad \cdots\cdots(3\text{-}3)$$

すなわち，フルードの相似律において式（3-3）を満足することは2系の間で$V/\sqrt{gL}$の値（フルード数と呼ぶ）を等しく置くことと同様である。

ここに

F_I：慣性力　　F_G：重力

M：質量　　α：加速度

V：速度　　g：重力の加速度

ρ：密度　　L：長さ

r：縮尺比

2）　粗度の相似律

波のみを取扱った問題では底面摩察の影響は非常に小さく無視して差しつかえない。従ってレイノズ数の問題も余り考慮せずに済む。ところが河口港の実験や海浜流が卓越した漁港の実験のように流れが関与した問題では底面の摩察力が大きな要素とはなるが重力が最大外力であることには変わりない。そこで，この様な場合には摩察力の影響は底面の粗度係数で調節を行なうのが一般的である。

Manningの平均流速公式によれば，粗度係数nの相似比n_rは，歪みなし模型の場合，式（3-4）となる。

$$n_r=L_r^{1/6} \qquad \cdots\cdots(3\text{-}4)$$

3）　実際に使用する相似律

漁港の波浪遮閉実験に使用する相似律はフルードの歪みなし模型である。この理由は，波速は水深と波長により変わるため，模型を歪ませると波速が整合しなくなり屈折，回折は相似しなくなるためである。また，もし歪めると海底勾配が変わるため，反射および砕波の相似性も保てなくなる。図3-1は海底勾配と波形勾配とにより砕波の型が変化する様子を説明したものである。

しかし，例外として，港内のあびき現象の実験のように全実験領域が長波とみなしうる時（$L/d>30$）は歪めても差し支えない。表3-1には，静穏度実験に用いられる物理量についてフルードの歪みなし模型の換算比を掲げる。

3.2.2　縮尺効果

水理模型実験の縮尺は実験の目的によっても異なる

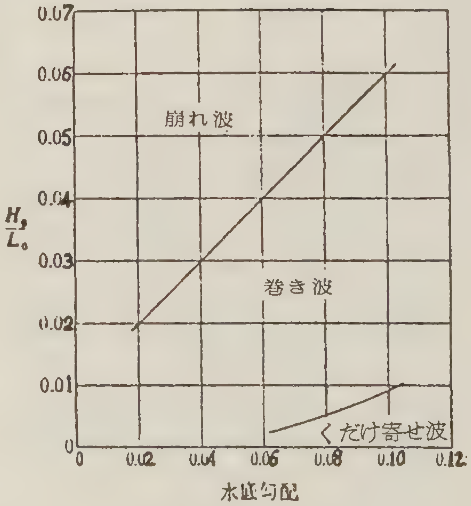


図 3-1　砕波の形式

Classification of breaking wave patterns

が，通常，漁港の静穏度実験では，$^{1}/_{50}$〜$^{1}/_{150}$の大きさのものが多い。選定する縮尺の大小は，実験の精度，実験区域の大小と実験施設の規模，現地の条件（波高，波長，砕波水深，港内水深等）などによって異なる。大寸法の模型は一般に，実験精度は良くなるが，模型製作，実験施設，光熱水などの費用が大きくなる。また，一定の大きさの水槽では，模型の大きさを大きくすると，境界の壁が相対的に近ずくため，次項で述べるように相似性に問題が生じる可能性もある。

一方，模型寸法を小さくすると，以下のような現象により，相似性が悪くなるので縮尺規模の決定にあたってはそれぞれの点について検討を加える必要がある。

1）表面張力の影響

表面張力をも考慮した波速Cは式（3-5）で表わされる。

$$C=\sqrt{\frac{\sigma 2\pi}{\rho L}+\frac{gL}{2\pi}\tanh\frac{2\pi h}{L}} \qquad \cdots\cdots(3\text{-}5)$$

ここに

σ ：単位面積に働く表面張力

ρ ：水の密度，L ：波長

h ：水深

このルートの中の第一項は表面張力，第２項は重力の効果を表わす。重力と表面張力との比は，深水域で$L_0=2\pi\cdot\sqrt{\sigma/(\rho g)}\fallingdotseq 2.5\,\mathrm{cm}$でほぼ同等となり，10cm以上となると表面張力をほとんど無規できる。実験対象とする海の波では重力が卓越しているので$\sigma 2\pi/\rho L$は省略することができ次式となる。

表 3-1　静穏度実験に用いる諸量の次元と換算比

Dimension and conversion ratio of varible scales used in wave sheltering test

物理量	次　元	換算比
長　さ	L	L_r
面　積	L^2	$L^2{}_r$
体　積	L^3	$L^3{}_r$
時　間	T	$L_r{}^{1/2}$
流　速	LT^{-1}	$L_r{}^{1/2}$
流　量	L^3T^{-1}	$L_r{}^{5/2}$
質　量	M	$L_r{}^3S_r$
力	$ML^{-1}T^{-2}$	$L^3{}_r$

注）Sは密度

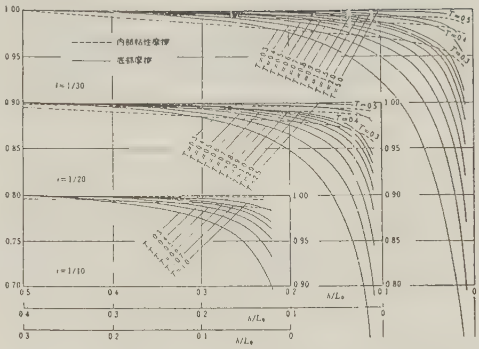


図 3-2　模型波の内部粘性および底面摩擦による波高減衰効果51)

Wave dissipation due to the effect of fluid viscosity and due to bottom friction

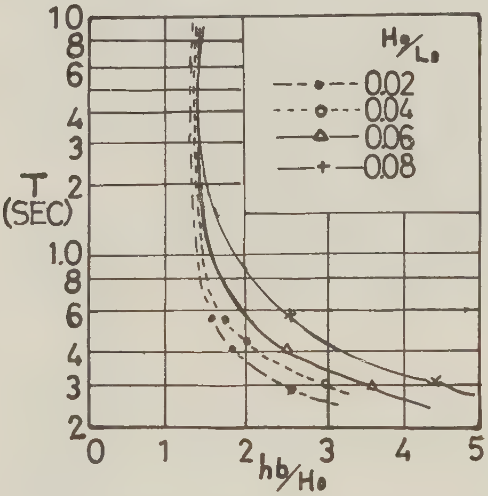


図 3-3　砕波水深におよぼす周期の影響（Diephuis）

Change of breaking water depth due to wave period

$$C=\sqrt{\frac{gL}{2\pi}\tanh\frac{2\pi h}{L}} \qquad \cdots\cdots(3\text{-}6)$$

模型においても，一般的縮尺の泊地静穏度実験では表面張力については選慮する必要はない。

2）内部摩擦および底面摩擦の影響

水の粘性のための内部摩擦による波高減衰は式（3-7）によって表わされる。

$$\frac{H_0'}{H_0}=e^{-\frac{8\pi^2\nu t}{L_0^2}} \qquad \cdots\cdots(3\text{-}7)$$

ここに，

ν ：水の動粘性係数

t ：伝達時間（単位；秒）

H_0'：波高 H_0 の沖波が減衰して到達した波高

時間 t の代りに距離であらわすと，$x=\sqrt{gL_0/2\pi}\cdot t$ であるから

$$\frac{H_0'}{H_0}=e^{-\frac{8\sqrt{2}}{\sqrt{g}}\frac{\pi^{5/2}\nu}{L_0^{5/2}}\cdot x} \qquad \cdots\cdots(3\text{-}8)$$

従って，実験における実験領域程度の伝達距離ではほとんど1になり，波高の減衰は無視できる。また，模型における大体の目安として，減衰率は次式のようになる。

$$\left(\frac{H_0'}{H_0}\right)=1-0.064\frac{x_m}{L_{0m}{}^{5/2}}：（\text{cm単位}） \qquad \cdots\cdots(3\text{-}9)$$

この場合も波浪の模型実験では周期が0.5秒以上あれば，内部摩擦については特に配慮する必要はない。

底面の摩擦についてはその影響は非常に小さいとされているが，遠浅の海岸の実験ではその影響を検討し，必要があれば前節で述べたように粗度の調節を行う。しかしながら，一般には，波を主体とする実験では0.5秒以上の周期を採用すれば底面摩擦は無視してもよいとされている。図3-2は，一様勾配での内部摩擦による波高減衰率と底面摩擦による波高減衰率を示す。

3）　砕波水深に対する影響

漁港の場合，防波堤の前面で砕波することが多い。一方，この砕波水深は模型縮尺により，相対位置が変わることが指摘されている。図3-3に示す Diephius[52] の実験によると，波形勾配が小さい時は周期が0.7秒以上程度であれば，同一波形勾配の波については砕波水深の変動はないが，波形勾配が大きく0.08程度になると，少なくとも模型波の周期は2秒以上でないと砕波水深比 hb/H_0 が大きく実物と異なる。すなわち，縮尺を小さくすると，砕波水深は深い方へ移り砕波し易くなる。

以上のことより，模型の最小縮尺を決める要因は砕波現象となることが多い。

4）　消波構造物に対する縮尺効果

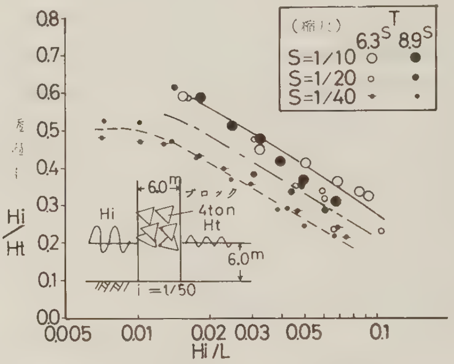


図 3-4　縮尺比による透過率の変化

Change of transmission ratio through permeable breakwater due to model scale

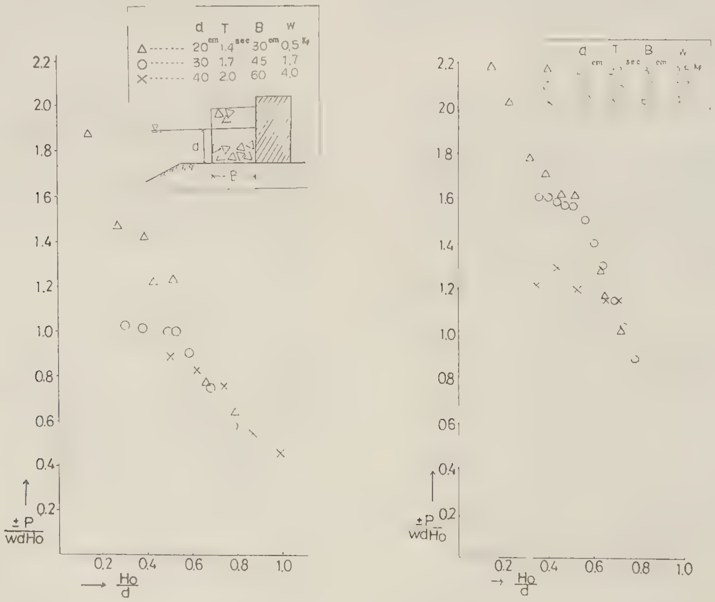


図 3-5　縮尺比による透過波圧の変化[53]

Change of wave pressure through permeable breakwater due to model scale

異型ブロックを用いた構造物はその内部で水流の乱れを起こさせて波を消している。この場合，消波効果はレイノルズ数に関係するため縮尺効果が現われる。

消波構造物の透過波については図 3-4 に示す著者の実験では，模型縮尺比を幾何級数的に変えて行った場合，その透過率は，模型が小さくなるに従って小さくなった。

また直立壁の前面を被覆した消波工の場合，それを通過した波圧は，図 3-5 に示す通り，波高対水深比が小さい時，無次元波圧は模型が小さい程小さくなっている。この事は小さな模型を用いると，消波工を通った波の直立堤上への越波は大きく現われることを暗示している。

一方，透過堤からの反射率についても，模型が小さい場合は異なってくるが，形状等を歪めても反射率が合うように配慮する必要がある。

3.2.3　境界条件の相似

模型諸量の相似条件については，上記の相似率を適切に選んで満足させることができるが，水槽実験では実物にはない模型上での境界ができる。すなわち，

① 水槽側壁および造波板で反射が生じる。
② 導波板など人工壁の近傍は砕波し易い。
③ 人工壁付近の海浜流等の流れは変わる。

などの相似性に対する問題が残されており，反射を生じる側壁に消波工を設置しても，なお残る小さい反射が問題になることもある。実験に際しては，導波板や消波工を現実の波の状況と合うように調整することが大切である。

3.3　実験の装置と模型

3.3.1　実験施設

1）　平面水槽

水槽の大きさは模型の大きさによって決まるが，漁港を対象とする波浪遮閉実験では一般に25m四方あれば収容でき，深さも0.8m程度で良い。形は矩形のものが多いが多方向からの波について実験する場合は扇形のものも有利である。この水槽の付帯施設として悪天候による実験の阻害を防ぐため，上屋又は防風柵，実験の迅速な実行のため，1，2時間で水の出し入れができる貯水タンク及び給排水装置などを備えることが望ましい。

2）　造波装置

造波装置の能力も対象とする漁港の波の条件から決まるが，一般的な施設としては，波高1～10m，周期8～20秒の波を対象とし，縮尺$^{1}/_{100}$の時は波高1～10cm，周期0.8～2.0秒，縮尺$^{1}/_{50}$の時は波高2～20cm，周期1～3.0秒の能力を有することが望ましい。

造波する波の種別としては規則波と不規則波とあるが不規則波でも現地の波を完全に再現できるものでなく，波の周波数スペクトルのみ合わせるものが多く，方向スペクトルを持った波の造波については研究開発の段階にある。

造波板運動の形式としては，図 3-6 に示すように，フラップ型，プランジャー型，ピストン型などが主なものである。フラップ型は造波板の下端をヒンジとし，上端を動力で前後させて波を造るものであり，機構的に最も簡単であるので利用される例が多い。

ピストン型は水槽に鉛直に立てた板を水平方向に動かして波を造るものであり，浅水域においても，波長の長い波まで造ることができるが，機構的にはガイドの部分がやや複雑になる。従って，浅い所を対象とし，波高が大きい波を発生さす場合にはピストン型造波機が適している。

プランジャー型は直角三角柱を横に寝せて水中に上下させ波を発生させるものであり，機構的に複雑であるため高価であるが，前記の2型式に比べ後方への波の発生が少ないなどの特徴を有する。又，浅すぎると造波ができない。

一般に波の限界波高は，波形勾配 $H/L=0.14$ と限界水深 $H/h=0.78$ によって決まる。しかし，造波機によって発生できる波高は経験的に式（3-10）によって決まる。

$$\left.\begin{array}{r} H/L\leqq 0.10 \\ \text{かつ,}\quad H/h<0.50 \end{array}\right\} \qquad \cdots\cdots(3\text{-}10)$$

しかし，ピストン型造波では，さらに，以下の2つの条件により造波できる波高が制約される。第1の条件としては波長に比べて水深が大きい場合，すなわち深水域では，造波地点での波高は一様であるが，波形勾配が大きいと図 3-7 Aのように波が進行するにつれて波高が不揃いとなる。かつ，L/h が0.6以下ではほとんど波は伝わらない。これは，波長が短かいにもかかわらず造波板が底面近くの水も動かすため波動運動が乱れて，波速が一定せず，ビート現象を生じ，波形勾配が大きくなった所

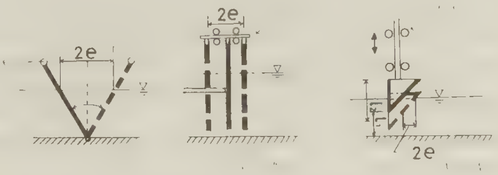


図 3-6　造波板の運動形式

Moving from of wave making boad

で砕波するためと推定する。著者が調査した造波機の例では，図3-8に示すように L/h が2.0以下の時に波高の減衰が現われている。

第2の条件は波長が大きい場合，図3-7 Cに示すように波形が乱れて2次波峯が発生することである。石田[54]によれば，アーセル数 U_r が30を越えるとこの問題が生じると述べている。図中に $U_r=30$ を1点鎖線で示し，実測波形に2次波峯が発生しているものは三角印で示したが，ほぼこの線と合っている。

上記の範囲内で所定の波高を発生さすのに必要な造波板振幅 e は式(3-11)で導びかれている。

$$e=\frac{\sinh 2kh+2kh}{8\alpha\sinh^2 kh}H \qquad \cdots\cdots(3\text{-}11)$$

ただし，α は造波効率，k は波数である。この振幅を得る方法として，定速回転運動をピストン運動に変えるクランク式を採る場合，回転半径 $r(=e)$ と連結アーム長さ l との比を或る程度以上大きくしないとピストン運動は正弦運動から歪んでくる。この誤差 Δ は式(3-12)により推定できる。

$$\Delta=l-\sqrt{l^2-r^2} \qquad \cdots\cdots(3\text{-}12)$$

従って，回転半径の4倍以上の連結アーム長があれば Δ/e は3％以下となる。

ピストン運動を得るその他の方法として，ボールネジを使って，その正逆転により前後運動を行うものもある。これは特殊な低慣性直流モータが必要である。

3）　計測台車

水槽内に足を入れることなく，又能率よく観察や計測を行うためにはモーター付の台車を用意することが望ましい。この走行桁の構造としては，トラス構造やガータ構造が多く採用されるが，設計上最も注意すべき点は人や計測器が乗った時のたわみが小さいこと，および自由振動の周期が波の周期より充分に小さいことである。特にサーボ式のセンサーを乗せた時は共振を助長することがある。台車の走行速度は2～10m/分位が適当であろう。

4）　消波装置

造波板の背後へ発生する波や防波堤などの模型構造物からの反射波などが再反射した所要の波以外の波を抑えるために消波装置が必要である。消波装置として小砂利を敷いた緩斜面が有効であるが，広いスペースを要す。設置が簡便なものとしてフィルムパッキン材を詰めた金網かごが良く使われる。この反射率は一般に20～30％程度である。

5）　導波板

造波機によって起こされた波を発散させないように模型の所要の地点まで導びく必要がある。このための仕切り板を導波板という。これは移動し易いように通常木板か耐水性合板に脚を付けたものが用いられる。この長さは1～2m程度，高さは水深により数種類用いる。この設置方法は波の拡散を防ぐだけでなく，波の進行方向に沿うように並べ，導波板による波の反射や収レンが生じないようにしなければならない。

3.3.2　計測装置

泊地の静穏度実験に必要な測定項目は波高，流速，波向き，砕波点などである。

1）　波高測定

模型用の波高計として現在商品化されているものとして，容量式波高計，サーボ式波高計，超音波式波高計な

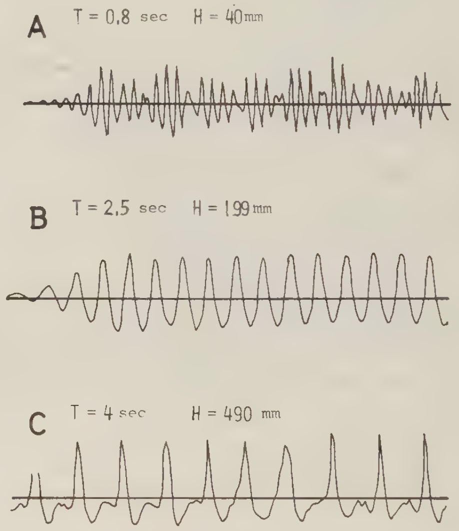


図 3-7　造波波形記録（50m地点）

A record of waves made with wave generator

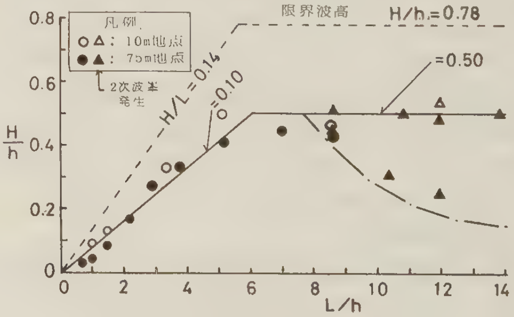


図 3-8　造波波高の限界値

Limit of wave height made with piston type wave generator

どがあげられる。著者は直線性や応答性も優れ，かつ比較的安価な容量式波高計を利用している。この計器の欠点は水面の上昇時と下降時でやや履歴が残り微小な波高のとき問題がある。この誤差を小さくするには細い線材を用いる必要がある。サーボ式波高計とはポイントゲージの先端がサーボ機構により水面を自動的に追尾する方式のもので精度は高いが欠点としては，加速度が大きい波に対しては追従できないことである。

超音波式波高計は空中から下へ発射した音波が水面で反射して検波されるまでの時間により水面高を計測するものであり，水に接することなく測定できる特徴を持っているが，水面の勾配が急な砕波点近くでは測定できないという欠点も有している。

以上の計測器からの出力電圧は，ペンオシログラフやサーボモータ式記録器の紙面上に記録され，物指し又は図形読み取り装置により数量化される。また，データレコーダに記録し，又は直接 AD 変換器を通して電算処理する場合もある。

2） 流れ測定

航路筋の流れや長周期波のあびきによる流れの測定には模型用小型流速計や浮子あるいは染料が用いられる。模型上の流速を測定することを目的に作られたものとして，小型プロペラ流速計（プロペラ径 5 ～20mm），熱線流速計，電磁流速計などがある。平面造波水槽内で使用する場合は，変動流速を測るために応答性が早く，正逆流が測定できて，できるだけ小型のセンサーを選定することが必要であり，価格，耐久性，小型という観点から著者は ϕ5mm のプロペラ流速計を使用している。

平均流をとらえるには浮子や染料を散いて写真撮影する方法を採ることが多い。浮子は軽いと風の影響を受けたり波乗り現象を生じて正しい流れを表現しなくなる恐れがあるので，水より僅か比重が小さいもの，例えば，パラフィン，キルク，スポンジを水に侵したもの，釣り浮きに錘を付けたものなどが選ばれ，白色に着色して用いる。染料には緑色のフルオレスフェン，赤色のローダミンB，紺色のメチレンブルーなどが用いられる。

3） 写真機類

波の向き，反射状況，越波，砕波位置の撮影および流れ測定のための浮子や染料の撮影などに35ミリスチールカメラや8ミリムービーカメラが使われる。35ミリカメラには焦点距離28～32ミリの広角レンズ付のものが便利である。また，最近はビデオカメラも普及してきておりスローモーションやストップモーションが可能なので観察や計測に有効である。

3.3.3 固定床模型

模型縮尺が決まると次に

① 模型製作範囲の決定
② 模型製作平面図，断面図等の設計図作成
③ 模型製作現場作業
④ 模型の検証

の順に模型製作を進める。

(1) 模型製作範囲の決定方法

海底地形を作る範囲として，水深は実験沖波波長の10～20％の範囲で波向や海底地形，波高水深比などを考慮して選定するのが望ましい。

水深が沖波波長の50％以下になると屈折などが生じるが，水深が波長の30～40％のところではその変化量は小さいため図解法による解析で充分な精度が期待できる。

波高の変化や浅水係数の水深による変化は図 3-9 に示すように波の入射角によって異なり，入射角が大きい程それらの変化も大きいため，波が海岸線に平行な方向から来る場合は，より深い範囲まで海底模型範囲を伸ばす必要がある。

さらに，波高と水深の比が小さい場合は非線形性や砕波が生じ，造波条件の決定が難しくなる。そのため，模型の水深は波高の 3 倍以上で，微小振幅波により浅水係数を計算できる水深とすることが必要である。造波部水深が模型最深部より深い場合は，現実に即した波の伝播状態となるように地形の接続を行なう。また，波の伝播範囲が事前に判明している場合はその範囲付近のみの海底模型床としてよい。一方，造波機の位置は，防波堤等の反射体から 5 波長以上隔れて設置できるように模型の位置を決めるのが望ましい。

(2) 模型の設計について

模型の範囲が決まったら，まず模型の平面図を作成する。その際，使用される海底地形の資料として港域深浅

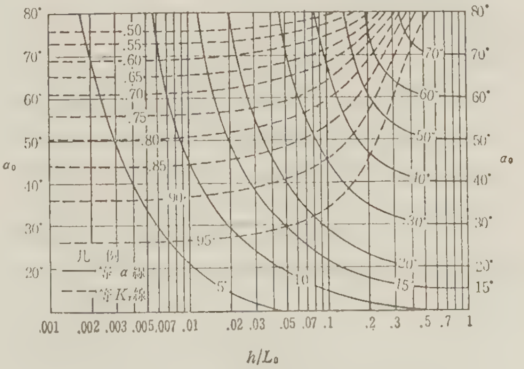


図 3-9 直線状海岸の屈折角と屈折係数

Reiraction nomograph for parallel depth contours

図，海図および漁場図が主なものであるが，暗礁部については地元漁業者からの聴取り調査を行い，また影響の大きい岩礁については航空写真等から図化するなどの補間調査が必要である。防波堤や岸壁などの構造物については，断面図が必要であり，地形と一体で作る場合と別に作って後で設置する場合とがある。後者は計画部分や撤去する必要がある部分に適用される。なお消波工や透過堤の模型では堤体材料をカゴ入りフィルムパッキン材や小砂利斜面で代用し，反射率や波高伝達率のみ相似を保つようにすることもある。

モルタル模型の完成精度について，著者は以下の値を採用している。

水平精度：水平距離および構造物の位置の許容誤差は±10mm 以下とする。

鉛直精度：水深については一般に許容誤差を ±5mm とし，重要部は±3mm とする。防波堤や岸壁の天端高についても同様である。

なお，波に影響のない陸上部は一定高の水平床としている。

規則波を用いる実験においては，越波による伝達波が現実の波と相似するように模型防波堤の天端高を決める必要がある。合田ら55)の実験結果によると，規則波の越波による伝達波の$1/3$最大波高は不規則波実験による伝達波の$1/3$最大波高とほぼ一致したと述べられている。又，文献56)によると，規則波の伝達波高として入射波の周期と伝達波の周期が等しいとして波高を計算した値と，有義波計算した値とは差異は認められなかったようである。これらのことから，規則波による実験においても防波堤の天端高は実物の天端高を縮尺したものでほぼ良いと判断している。

(3)　模型の製作方法

a　等高線設定法

模型は砂で概略地形（素地）を作った上にモルタルを表面に打って仕上げる。海底地形素地の造り方としては，水槽床又は崇上げした水平な仮床面に等深線を描き，これに沿って適当な間隔で木又は針金で作った柱を並べ立てる。さらに中詰め砂を柱の頭部近くまで入れ，十分に突き固め，木柱の場合はその頭部に釘を打ち，レベルでのぞきながら所定の高さまで打込んでゆく。針金の場合は高さを合わせて頂部を切断する。それらの釘列（又は針金）の高さにそろえてモルタルで等深線を追加し，突固め，モルタルを直線定規で測りながら張る。このモルタルの厚さは，著者の経験では2～3cmでよい。

b　断面設定法

前記の等高線の替りに，一定間隔に地形断面の形枠を作り，これを高さを調節しながら固定し，間に中詰砂を入れて突固め，上面にモルタルを張る方法である。この方法は比較的単純な地形を作るのに速く製作できる。著者は型枠に3mm厚の耐水ベニヤ板を使い，これを1m間隔に並べて海底地形を作った。

c　等深線ブロック法

地形を多数のブロックに区分けし，そのブロック毎に立体模型の型枠を作り，これにモルタルを流し込んで模型ブロックを成形する。これを水槽内に敷設し防水モルタルで仕上げる方法である。この方法は高い精度を作ることが可能である。

(4)　ペインティング

主要等深線，測定点及びその番号をペンキで記入する。又，防波堤及び水際線の構造物天端は着色した方が実験写真に都合がよい。

(5)　造波機の定位

沖波より屈折図を描き，造波位置水深での波向を求め造波板方向を合わせると共に，屈折係数と浅水係数より造波波高を求める。

3.4　実験の手法

3.4.1　実験の目的と実験条件の選定

実験を行う波浪条件として，波高・周期・波向きを決める必要がある。想定する波浪条件は，その漁港の機能により異なるので，その目的に合った波浪条件を選定する必要がある。

例えば避難港又はその機能を兼ね備える漁港では，近くで操業していた漁船が港口より逃げ込めること，さらにその船がしけが通り過ぎるまで港内で安全に停泊できることが必要である。そのため，実験条件として防波堤の設計波高などの最大級の波が選ばれる。

陸揚げ中心の漁港では，盛漁期中，魚を積んで入港してきた漁船の水揚げ，荷さばきが出来なければならない。従って盛漁期中の大部分で陸揚げ利用ができる様な計画を樹てる必要があり，未超過確率95～99％程度の波浪条件が選ばれることが多い。

地元の小型漁船のみ利用する漁港では，ある程度以上のしけ時には漁船は陸上に曳上げたり，他所へ逃げるなどの対処をすることが多い。この場合は操業可能な最大波高を実験条件として選定することが多い。

これらの場合の港内の目標波高は，海域により，漁船の大きさ，係留方法等により異なるが，避難時に0.5～1.0mは，陸揚げ，準備時には0.3～0.5m程度と設定するのが通常である。

3.4.2　計測の手法

実験の基準波高となる沖波の測定は，できるだけ地形の影響の少ない所で造波機から3波長以上離れた所で行う。測点は造波機と平行に3点位とり，その間の大小差がない様に調整する。

港内等の測点の配置は，広い港域では100mメッシュ，狭いときは50mメッシュ程度とし，重要な部分はその半分のメッシュとする。

このような測点を配置する方法のほかに，測線を波向き方向に選び，これに沿って台車上から走行測定する方法もある。この方法によると，反射の影響を受けた局所的波高のみを記録することはなく，平均値を測定しうる。

採用する波高記録は，エネルギーが定常になってから模型構造物からの反射波が造波板から戻ってくるまでとし，泊地内で多重反射が生じる場合は反射が入ったものを採用する。波高読取り後，波高に換算した値を平面図上に落とし，波高の分布図を書くと港内の状況が判断しやすい。しかし，波高分布が乱れている場合は周りの波高と平均して平滑化を行う。

以上の波高測定のほか，波の砕波位置，防波堤や岸壁の越波位置などの計測が必要である。

波以外の測定項目としては，港内平均水位の上昇量，それに伴う長周期振動とその流速などが挙げられる。

3.5 水理模型実験例（三崎漁港）

3.5.1 実験の目的

ここで水理実験例として採上げた三崎漁港は神奈川県三浦半島の先端に位置する特定第三種漁港（全国規模の漁港）であり，まぐろを中心とする遠洋漁業の全国有数の陸揚基地である。この漁港は城ヶ島を天然の防波堤として有効に利用して広い泊地を確保している。しかし，利用の増大に伴い新泊地の増設を行っているが，未だ充分な静穏度は得られず，模型実験により最終的な防波堤等の配置計画を検討することとなった。この漁港には島の両側から出入りできるように東と西に港口があり，それぞれの港口付近に次の様な目標を掲げて実験を行った。

① 東口：静穏度の確保，特に通り矢岸壁の新設に伴う泊地と航路の静穏度確保

② 西口：新岸壁の静穏度向上と旧防波堤の一部撤去に伴う従来泊地の静穏度維持

この目標に対処する施設計画案として図3-10に示す案が提案された。

3.5.2 実験方法

a） 実験条件

実験に用いる海象条件の選定方法として種々の方法が考えられるが，ここでは，当漁港が全国の主要漁港であり，荒天時の避難にも利用されること等を考慮し，最荒天時に相当する構造物の設計波を対象とすることとした。

また，波向きについては，東西両側に港口があるためそれぞれの港口に影響が大きいと想定される波向，すなわち，東口に対してはSSE，S，SSW，西口に対してはSSW，Wを選んだ。それらの波の周期及び波高は表3-1の通りである。潮位はHWL(+1.9m）とした。

b） 実験装置及び模型

平面水槽の約半分（40m×25m）を占有し，その中に$^1/_{100}$縮尺模型を図3-11のように作った。最大水深は−40mとした。

模型波として有義波相当の規則波を与えた。計測は容

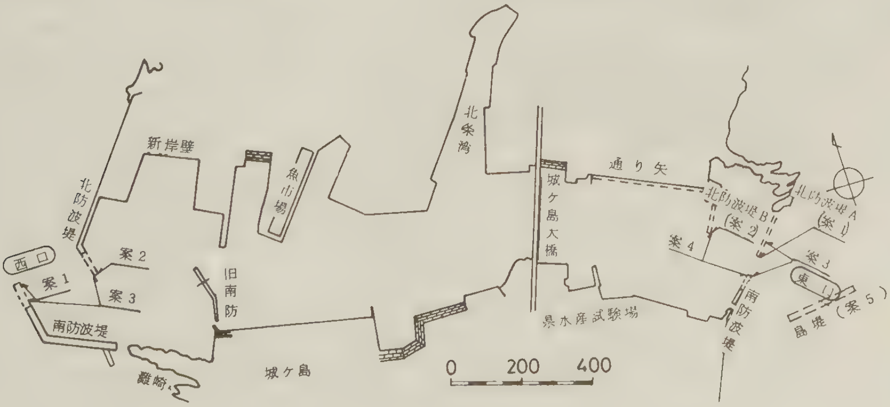


図 3-10 三崎漁港施設計画案

Plan of facilities in Misaki Fishing Port

量式波高計を用いて図3-11に示す・点で測定した。この測定点は100m メッシュを基本とし主要岸壁前面には補間点を設置した。

c） 実験ケース

施設配置案と実験条件の組合せにより表3-2のように選定した。当初ケース1～24を実施し，その結果について関係者による検討会を開き，調査の方向を絞って詳細な実験をケース25以降を実験した。

3.5.3　実験結果と考察

a） 予備実験

模型実験と現地との相似性を検証するために，現況の模型を造り，波高SSE，S，SSWについて，波高及び越波状況を調べた。この結果を図3-12に示す。

一方，現地においては，港内の波高測定記録等の実測資料はないが，図3-13に示すような記録写真が入手できた。この写真と模型実験の状況を比較すると，

① 東口南防波堤及び護岸の越波状況の一致

② 通り矢岸壁の越波状況の一致

③ 西口南防波堤の越波状況の一致

④ 西口新－6m岸壁の越波箇所の一致

など定性的ではあるが相似性を裏付けている。

表 3-2　実験波の諸元

Experimental wave conditions

沖波			造波地点波			
波向	沖波高	周期	位置	K_r	K_s	H
SSE	6.8 m	12 s	東口	1.07	0.916	6.7 m
S	7.2	14.5	東口	0.93	0.918	6.1
SSW	8.3	16	東口	1.00	0.929	7.7
			西口	0.92	0.929	7.1
W	2.6	7	西口	1.00	1.000	2.6

b） 東口泊地の検討（図3-14，15）

通り矢岸壁付近では，波高が大きい分布帯は波向SSE及びSSWのとき港の中心軸方向にSのときは通り矢岸壁に斜めに入射する。したがって，通り矢岸壁ではS波が最も大きく，これを防ぐには南防の延長か岸壁に近い北防Bを出すことが有利である。このように配置案②（ケース18）の北防Bは有利であるが，余り延長を長くとると航路の障害となるのでこの長さが限度と考えられ，静穏度の不足分は南防を延長する案（ケース34）がよいであろう。

通り矢岸壁を消波構造とすると，岸壁部の平均波高はやや減少する程度であるが，その分布を平滑化する働きがある。このため，岸壁上への越波を減ずることができる（ケース33）。

南防波堤を延長した場合の効果は，通り矢岸壁が直立の場合は明確でないが，それを消波式にすると効果が明確に現われる（ケース30）。

c） 航路部の検討

漁船が波とともに入港してくる場合を仮定すると，北防Aのように港口を狭めることにより波の進入は防ぐことができるが，船が入りづらくなる。と同時に港口付近の航路が固定され，波の状態により航路を選択する幅が狭められる。東口では，その沖方にある暗礁のため前傾した危険な波が南防先端付近まで伸びていることが観察される。ここに港口を固定する北防A案は危険であることがわかった。この対策として，暗礁の背後に島堤を造る案が有望である。この島堤案は，SSW の波に対しては静穏度の向上にも役立つが SSE 波に対しては遮閉効果は小さいので北防と組合せて設置する必要がある。従って，この案は 200m 以上の延長を必要とし，経済的には不利である。

d） 西口泊地の検討

西口よりの危険な波として波高と周期が大きいSSW波と開口部から遮閉なしに入るW波を条件として選んだが，このS波は沖波高 2.6m と小さく，現況においても港内静穏に問題が

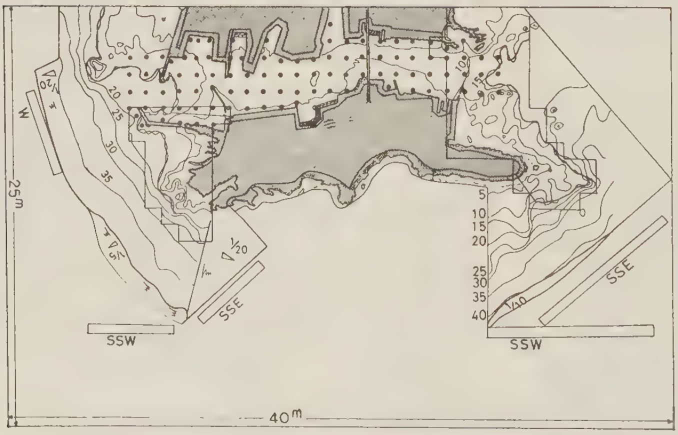


図 3-11　三崎漁港模型製作平面図（単位cm）

Plan making of Misaki Fishing Port scale model (unit: cm)

表 3-3　実験ケース一覧
List of test cases

ケース No.	波向	沖波高	周期	東口対策					西口対策			備考
				北防A	北防B	南防	島堤	消波岸壁	北防	南防	旧南防	
1	SSE	6.8	12 s									現況
2	〃	〃	〃	120								東案 1
3	〃	〃	〃		80							〃 2
4	〃	〃	〃				200					〃 5
5	〃	〃	〃	75								〃 1
6	〃	〃	〃	75				250				〃 3
7	〃	〃	〃	75		45		250				〃 4
8	SSW	8.3	16									現況
9	〃	〃	〃		80							東案 2
10	〃	〃	〃	75				250				〃 3
11	〃	〃	〃	75		45		250				〃 4
12	〃	〃	〃						70			西案 1
13	〃	〃	〃							70		〃 2
14	〃	〃	〃						70		△ 50	〃 1
15	〃	〃	〃							70	△ 50	〃 2
16	〃	〃	〃						70	70	△ 50	〃 3
17	S	7.2	14.5									現況
18	〃	〃	〃		80							東案 2
19	〃	〃	〃	75				250				〃 1
20	〃	〃	〃	75		45		250				〃 4
21	W	2.6	7.0									現況
22	〃	〃	〃							70		西案 2
23	〃	〃	〃						70			〃 1
24	〃	〃	〃							70	△ 50	〃 2
25	SSW	8.3	16	45				250				東案 1
26	〃	〃	〃	75		消波工		250				〃 1
27	〃	〃	〃				200					〃 5
28	SSE	6.8	12	75		消波工		250				東案 1
29	〃	〃	〃	45		45		250				〃 3
30	S	7.2	14.5		80	45		250				東案 4
31	SSW	8.3	16						45		△ 25	西案 2
32	〃	〃	〃						45	非越波	△ 25	〃 2
33	S	7.2	14.5		80			250				東案 2
34	〃	〃	〃		80	45						〃 4
35	SSE	6.8	12		80	45 （消波工）		250				東案 4
36	〃	〃	〃		80	45		250				〃 4
37	SSW	8.3	16						45 （75）		△ 25	西案 2 （波除堤）
38	〃	〃	〃						45	70 （岩礁部）	△ 25	

注 1）　数字は構造物の延長（m）　　注 2）　△印は撤去延長（m）

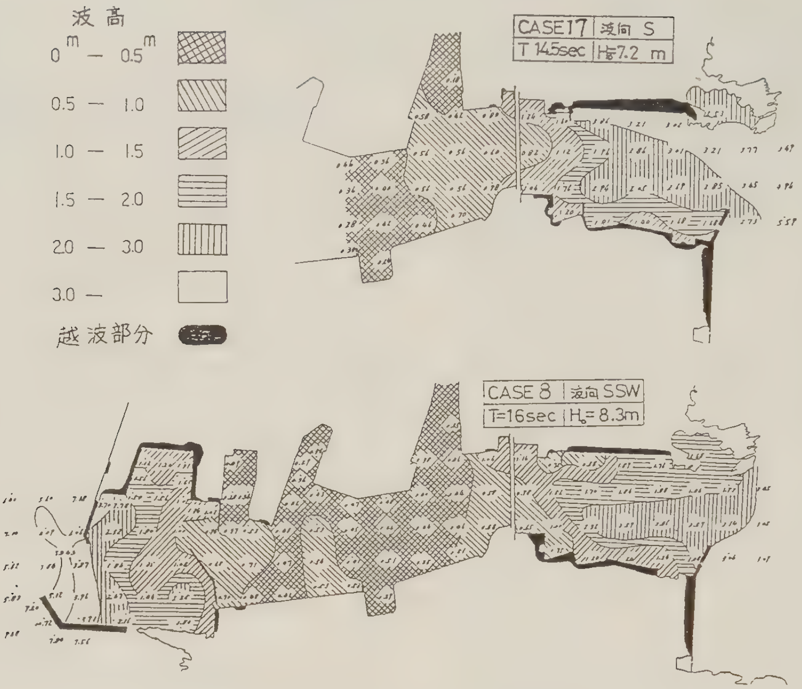

波高
0m — 0.5m
0.5 — 1.0
1.0 — 1.5
1.5 — 2.0
2.0 — 3.0
3.0 —
越波部分
CASE17 波向 S
T 14.5sec H≒7.2 m
CASE 8 波向 SSW
T=16sec H0=8.3m

図 3-12 現況波高分布（波向別）
Distribution of wave height at existing state

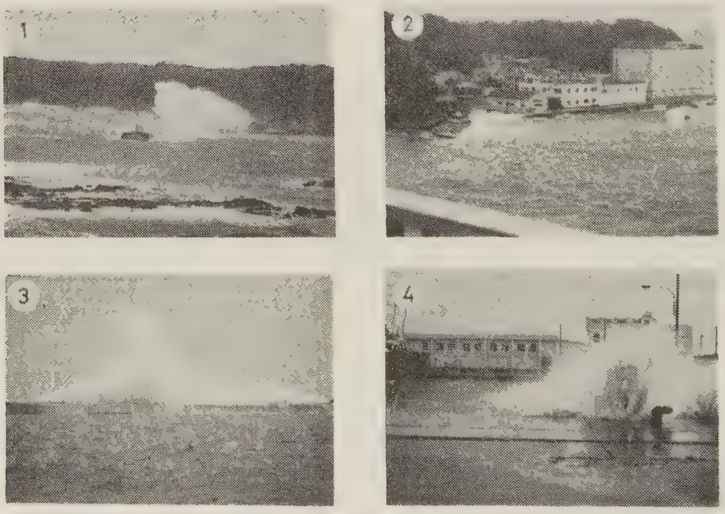


図 3-13 越波の現況写真
Photo of wave over topping

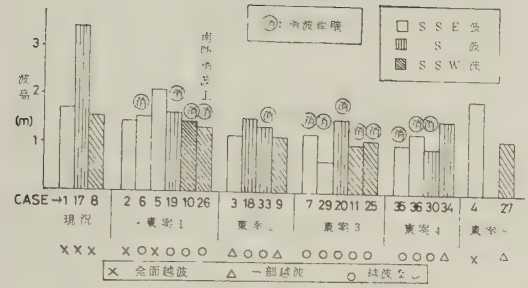


図 3-14　通り矢岸壁の前面波高（3点）と越波
Wave height in baisn faced to Tōriya Quay and overtopping on the quay

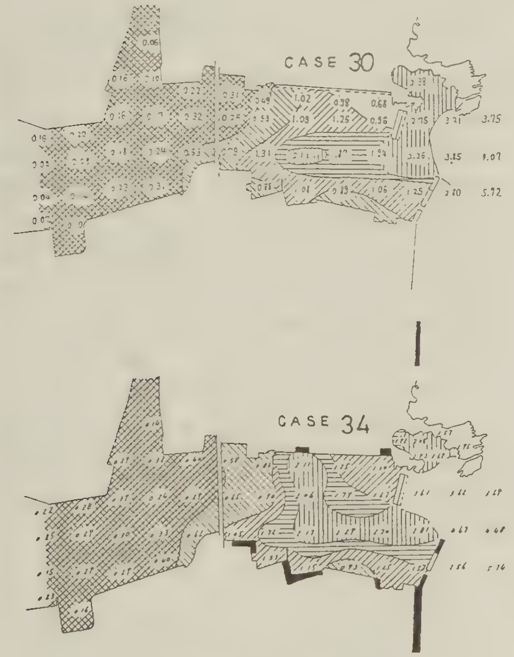


図 3-15　東口改良案波高分布
Distribution of wave height in case of east entrance improvement plan

ないことがわかったので，防波堤配置案の比較は SSW 波について行うこととした。（図3-16）

西口付近の新泊地は，港口開口部からの回折波，南防よりの越波，南防取付け部の小開口部とそこの岩礁を乗越えた波などが重なり合ってかなり乱れている。一見，越波の影響が強いように観察されるが，波のエネルキーの大きさは港口からの回折波が最も大きいことが波形から判断された。従って，まず，この波を阻止すべく，南防と北防を70m延長して比較したところ北防が岸壁部にとって効果的であると判断した。（図 3-17，ケース15 対 14）

しかし，この案で充分な静穏度は得られず，また，防波堤をさらに延長することは航路を狭め難しいことから，越波防止による静穏度確保を検討した。

現状では南防で波が数10m打上がっており，防波堤に通常の消波工を附設すると，その表面を波がはい上がり，港内へ溢流する。この場合の効果は，伝達波高が9%程度減小したに過ぎず，また，南防取付け部の瀬の部分を塞いでも全体的な効果は現われなかった。

状況の再検討の結果，図3-18に示すような防波堤背面からの再反射波が観察されたので，再反射の少ない，より短い堤長について実験検討した結果，割合静穏な案として西案2のケース31（北防45m延長案）が得られた。

3.5.4　実験の結論

水理模型実験により三崎漁港内の静穏度改良を試みた結果，

① 東口では東案4又は東案3が良好である。

② 西口では西案2（ケース31）が良い。

という結論が出た。この結論に達する過程で前方暗礁の航路部への影響，及び防波堤配置とその背面再反射，防波堤の越波の問題を主に検討した。この実験により得られた結果を活かすことにより，その効果は，防波堤延長の短縮，設置水深の減少等による経済的効果並びに泊地及び航路の安全性の向上に少なからず役立つものと信ずる。しかし，未だ西口の南防波堤の越波対策は今後の問題として残されている。

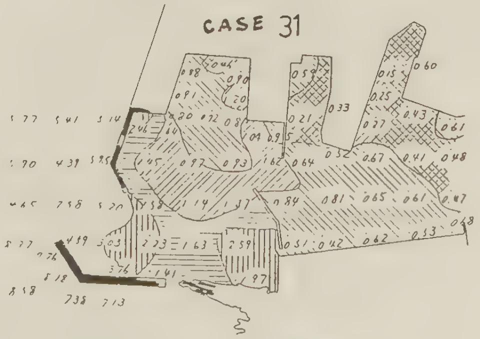


図 3-16　西口付近波高分布
Distribution of wave height in case of west entrance improvement plan

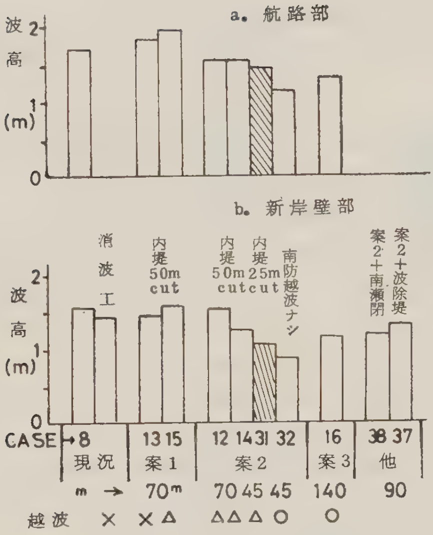


図 3-17 西口付近の平均波高

Mean wave height nearly inside of the west entrance

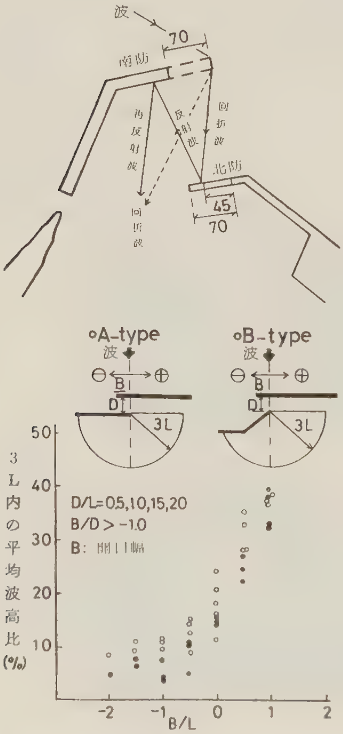


図 3-18 防波堤の重なりと泊地平均波高

Mean wave height in baisn in accompany with breakwater's covered length

4. 数値模型実験による予測法

4.1 序

漁港施設の配置を計画する場合，港内外の波浪の問題が一つの重要な要素となっている。この波浪状況を予測するために，従来から平面水槽による水理模型実験が行われてきたが，この実験には多額の費用と専用の実験設備とを要し，また，実験とその取りまとめにも多大な労力とかなりの期間とを必要とする。一方，これを数値実験により代えることができるならば，費用，実験期間とも節約でき，電算機とプログラムがあれば実験できるという利点があり，漁港施設の平面配置計画策定のための有効な手段となるものと考えられる。

著者は，波の屈折，回折，反射などを同時に再現できるような波の数値実験プログラムを実用化するため，その開発に取り組み，一応の成果が得られたので，ここにその解析方法と実際への適用例を述べる。

水の波動運動を扱った数値解析法として，潮波の伝播等を問題とした白石57)の研究がある。また，波浪を対象としたものでは伊藤ら58),59)の研究があり，58)において一定水深のもとでの構造物周辺の波高の検討および造波方式と呼ぶ任意反射率の導入を行い，59)においては波向線交叉領域での波の屈折に適用したことが報告されているが，その手法の詳細は述べられていない。

著者60),62)は，白石57)による長波のシミュレーション方法に，波速の浅水補正，新しい波の任意反射率の導入波浪条件（波高，周期，波向）の任意設定などの独自の改良を行い，汎用的な波浪の変形のシミュレーションを可能にしたものである。

4.2 基礎方式

数値計算の基礎方程式としては，微小振幅長波の以下の式を考え，これを差分化して，ステップ・バイ・ステップで計算を行う。

運動方程式

$$\frac{1}{g}\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)+\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{n^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}u=0 \qquad \cdots\cdots(4\text{-}1)$$

$$\frac{1}{g}\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)+\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{n^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}v=0 \qquad \cdots\cdots(4\text{-}2)$$

連続方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial Q_x}{\partial x}+\frac{\partial Q_y}{\partial y}=0 \qquad \cdots\cdots(4\text{-}3)$$

ここに，

u，v：x および y 方向の流速成分

η ：水位（平均水面を0とする。）

n ：マンニングの粗度係数

g ：重力の加速度

Q_x, Q_y ：x および y 方向の単位幅流量

h ：水深（時間の関数としない）

とする。

図4-1に示すような leapfrog 法を用いて，式（4-1）の各項を$(k,\ l,\ j-1)$点を差分中心点として差分化すると，

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t}&=\frac{1}{\Delta t}\{u(k,l,j)-u(k,l,j-2)\}\\
\frac{\partial \eta}{\partial x}&=\frac{1}{2\Delta x}\{\eta(k+1,l+1,j-1)-\eta(k-1,\\
&\quad l+1,j-1)+\eta(k+1,l-1,j-1)\\
&\quad -\eta(k-1,l-1,j-1)\}\\
u&=\frac{1}{2}\{u(k,l,j)+u(k,l,j-2)\}
\end{aligned}\right\}\cdots(4\text{-}4)$$

となり，式(4-2)についても同様に差分化できる。式(4-4)を式(4-1)に代入すると，

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{g\Delta t}\{(u(k,l,j)-u(k,l,j-2))\}+\frac{1}{2\Delta x}\\
&\quad\{(\eta(k+1,l+1,j-1)-\eta(k-1,l+1,j-1))\\
&\quad+(\eta(k+1,l-1,j-1)-\eta(k-1,l-1,j-1))\}\\
&\quad+\frac{1}{h^{4/3}}n^2(u^2(k,l,j-2)+v^2(k,l,j-2))^{1/2}\\
&\quad\times\frac{1}{2}(u(k,l,j)+u(k,l,j-2))=0 \quad\cdots\cdots(4\text{-}5)
\end{aligned}$$

これより，$u(k, l, j)$ を求める陽関数となるように変形すると，

$$\begin{aligned}
u(k,l,j)=&-\left\{-\frac{1}{g\Delta t}u(k,l,j-2)+\frac{1}{2\Delta x}\right.\\
&\times(\eta(k+1,l+1,j-1)-\eta(k-1,l+1,j-1)\\
&+\eta(k+1,l-1,j-1)-\eta(k-1,l-1,j-1))\\
&+\frac{n^2}{2h^{4/3}}(u^2(k,l,j-2)+v^2(k,l,j-2))^{1/2}\\
&\left.\times u(k,l,j-2)\right\}\Big/\left\{\frac{1}{g\Delta t}+\frac{n^2}{2h^{4/3}}\times(u^2(k,l,j-2)\right.\\
&\left.+v^2(k,l,j-2))^{1/2}\right\} \qquad\cdots\cdots(4\text{-}6)
\end{aligned}$$

次に，添字について以下の変換を行う。

mは（$k+1$)/2 の整数商

nは（$l+1$)/2 の整数商

とし，k，l は流速点で奇数となるように計算格子点を配置すると，式(4-6)は次のように代わる。

$$\begin{aligned}
u(m,n,j)=&-\left\{-\frac{1}{g\Delta t}u(m,n,j-2)+\frac{1}{2\Delta x}\right.\\
&\times(\eta(m,n,j-1)-\eta(m-1,n,j-1)\\
&+\eta(m,n,j-1)-\eta(m-1,n-1,j-1))\\
&+\frac{n^2}{2h^{4/3}}(u^2(m,n,j-2)+v^2(m,n,j-2))^{1/2}
\end{aligned}$$

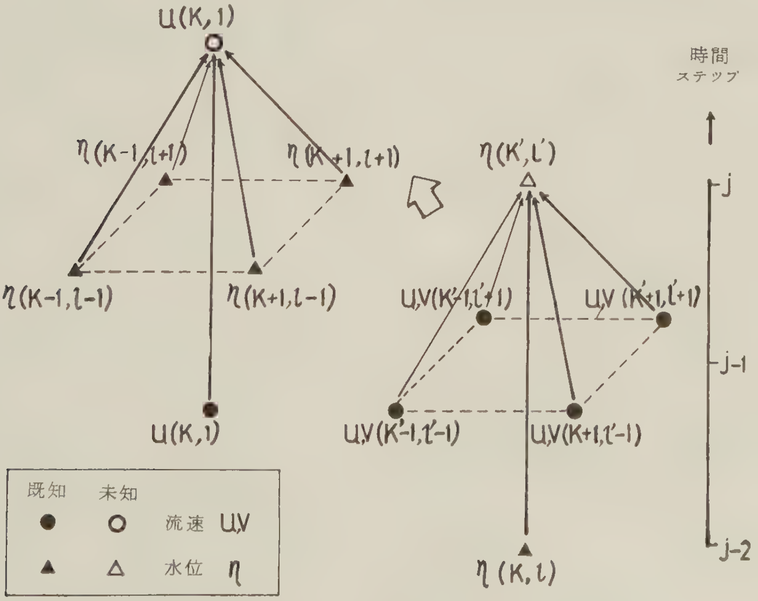


図 4-1　計算の進め方

Path of calculation

$$\times u(m,n,j-2)\Big\}\Big/\Big\{\frac{1}{g\Delta t}+\frac{n^2}{2h^{4/3}}$$

$$\times u^2(m,n,j-2)+v^2(m,n,j-2))^{1/2}\Big\}$$

……(4-7)

また，式(4-2)の項目についても同様に差分化を行えば，

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial\eta}{\partial t}=-\frac{1}{\Delta t}(\eta(k',l',j)-\eta(k',l,j-2))\\
&\frac{\partial Q_x}{\partial x}=-\frac{\Delta y}{\Delta x}\{(h(k',l')+h(k'+2,l))/2\\
&\quad\times(u(k'+1,l'+1,j-1)+u(k'+1,\\
&\quad l'-1,j-1))/2-(h(k',l')+h(k'-2,\\
&\quad l'))/2\times(u(k'-1,l'+1,j-1)\\
&\quad +u(k'-1,l'-1,j-1))/2\}\\
&\frac{\partial Q_y}{\partial y}=-\frac{\Delta x}{\Delta y}\{h(k',l')+h(k',l'+2))/2\\
&\quad\times(v(k'+1,l'+1,j-1)+v(k'-1,\\
&\quad l'+1,j-1))/2-(h(k',l')+h(k',\\
&\quad l'-2))/2\times(v(k'+1,l'-1,j-1)\\
&\quad +v(k'-1,l'-1,j-1))/2\}
\end{aligned}$$

……(4 8)

添字については前と同様の交換を行う。

mは $(k'+1)/2$　の整数商

nは $(l'+1)/2$　の整数商

いま，k', l' は水位点を偶数の格子点とすると，$\Delta x=\Delta y$ であるから式(4-3)は次のようになる。

$$\begin{aligned}
\eta(m,n,j)=&\eta(m,n,j-1)-\Delta t\{(h(m,n)\\
&+h(m-1,n))/2\times(u(m,n,j-1)\\
&+u(m,n+1,j-1))/2-(h(m,n)\\
&+h(m+1,n))/2\times(u(m+1,n,j-1)\\
&+u(m+1,n+1,j-1))/2\}-\Delta t\{(h(m,n)\\
&+h(m,n-1))/2\times(v(m,n,j-1)\\
&+v(m+1,n,j-1))/2-(h(m,n)\\
&+h(m,n+1))/2\times(v(m,n+1,j-1)\\
&+v(m+1,n+1,j-1))/2\}
\end{aligned}\qquad\cdots\cdots(4\text{-}9)$$

一方，式(4-10)で示される微小振幅浅水波の波速は式(4-11)の長波の波速との間に差異が生じる。そのため，各点の実際の水深の代わりに，換算水深 h^* に置き換える操作を，式(4-12)で行う。

$$C=\frac{L}{T}=\sqrt{\frac{gL}{2\pi}\tanh\frac{2\pi h}{L}}\qquad\cdots\cdots(4\text{-}10)$$

$$C=\sqrt{gh^*}\qquad\cdots\cdots(4\text{-}11)$$

$$h^*=L^2/(gT^2)\qquad\cdots\cdots(4\text{-}12)$$

以上の置き換えを行うことにより波速および波長を微小振幅浅水波と整合を計る。なお波長Lの値は(4-10)式よりニュートン法を用いて求める。

4.3　境界条件

4.3.1　海陸の境界

図4-2に示すように，地形上に大きさ$\Delta S\times\Delta S$の正方形の格子を組み，この格子点を流速点とする。また，この各格子の中央に水位点を配置する。さらに，海域と陸域との境界はこの格子線に沿って配置する。従って，流速点のみが境界点となる。

現地の地盤高（水深）は水位点で与え，海域は負の数陸域は正の数（100.0か200.0）とする。視点を変えると，流速点である格子点の周りには4個の水位点があり，この点の地盤高が，全て負の時は海域の中にあり，逆に全点が正の値の時はこの流速点は陸域の中にある。従って4点のうち負の地盤高が1～3点の場合は流速点は境界線上であることが判別できる。

以上のことを図示したものが図4-3である。ここに，境界線に隣接した陸域の地盤高が，200とした時は，境界線上でこれに直角方向の流速をゼロとする。すなわち，同図の(ロ)ではXY両方向，(ハ)ではX方向のみ流速が存在し，(ニ)では両方向とも流速はゼロとなる。この条件は，構造物のため波が反射することを示す。なお，この計算はサブルーチン BOUND で行う。

4.3.2　波の反射なし境界

境界線に隣接した陸域の地盤高が100という記号の時は，反射なし境界を意味し，境界線でこれに直角方向の流速は前方の流速点と同じ変化をし，伝達時間(t')だけ遅れるものとする。この条件は，この境界線で波が全く

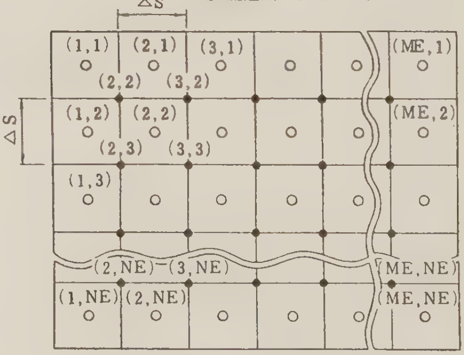


図4-2　流速点および水位点の配置

Arrangement of velocity points and water level points

反射しないことを意味する。すなわち，境界線の流速は前方の流速点の（ΔS/伝達時間）だけ以前の流速に等しく置けばよいが，その値の推定には以下の補間法を用いることとする。

いま前方の流速点の座標を（$m+1, n$）とする場合を例にとると，図 4-4 に示す各点の配置となる。

波の進行方向は境界線に直角方向に対して θ の角度を持つと，θ は式(4-12)で計算される。

$$\cos\theta=\frac{|u|}{\sqrt{u^2+v^2}} \qquad \cdots\cdots(4\text{-}12)$$

このため，波の伝達の遅れ t' は，

$$t'=\Delta S\cdot\cos\theta/c \qquad \cdots\cdots(4\text{-}13)$$

この t' を計算ステップ Δt との比をとって，無次元化し，e_n とすると，

$$e_n=\frac{t'}{\Delta t}=\frac{\Delta S}{\Delta t}\cdot\cos\theta/c \qquad \cdots\cdots(4\text{-}14)$$

この e_n の値により u の推定式を分け，e_n が 1 未満の場合は前方の u_6 と u_4 より内挿して

$$u=u_6+(u_4-u_6)\cdot e_n \qquad \cdots\cdots(4\text{-}15)$$

ただし，

u ：未知流速

u_6 ：$u(m+1, n, j)$

u_4 ：$u(m+1, n, j-1)$

e_n が 1 以上の時は，推定地点の 1 ステップ前の値 u_m を前方位置における（e_n+1）ステップ前の値と見做して 3 点 u_m，u_4，u_6 より 3 点補間を行う。

ただし，u_m ：$u(m, n, j-1)$

$$u=u_4=\frac{(e_n-1)(u_m-u_6)}{e_n+1} \qquad \cdots\cdots(4\text{-}16)$$

この流速の補間を行うケースとしては，次の $+X$，$-X$，$+Y$，$-Y$ の 4 方向が考えられる。

B1とB3が海でかつB2とB4が無反射の時				$+X$
B2とB4	〃	B1とB3	〃	$-X$
B1とB2	〃	B3とB4	〃	$+Y$
B3とB4	〃	B1とB2	〃	$-Y$

ただし，B1，B2，B3，B4は，図 4-4 に示す位置の水深を表わす。

4.3.3　波の部分反射

波の部分反射をおこす境界では，境界面での推定透過流速を変更することにより反射率をコントロールする。即ち，反射の係数を R とし，前式の u より u' に透過流速を修正する。

$$u'(m, n, j)=u(m, n, j)\times(1-R^2) \qquad \cdots\cdots(4\text{-}17)$$

この式を使い，R の値を種々変えた時の，波形を $^1/_{10}$ 周期毎に計算した結果が図 4-6 であり，それから求めた反射率は図 4-7 に示す。

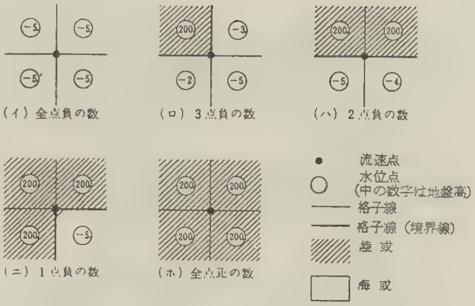

-5
-5
-5
-5
（イ）全点負の数
200
-3
-2
-5
（ロ）3点負の数
200
200
-5
-4
（ハ）2点負の数
200
200
200
-5
（ニ）1点負の数
200
200
200
200
（ホ）全点正の数
流速点
水位点
(中の数字は地盤高)
格子線
格子線（境界線）
陸 域
海 域

図 4-3　海陸の境界判別

Discrimination of boundary between sea and land

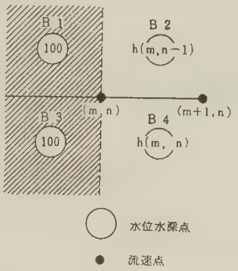

B 1
100
B 2
h(m, n−1)
(m, n)
(m+1, n)
B 3
100
B 4
h(m, n)
水位水深点
流速点

図 4-4　消波構造の境界値の流速計算例の説明

Illust of velocity calculation at wave absober boundary

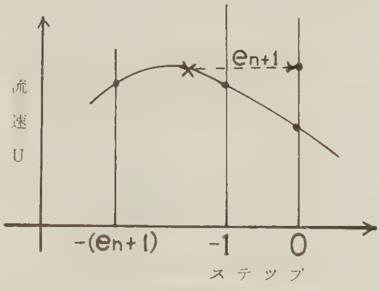

流
速
U
en+1
-(en+1)
-1
0
ステップ
3点補間方法

図 4-5　3 点補間方法

Method of interpolation of velocity

4.4　計算手法

4.4.1　プログラミング

実験波の波向を設定する方法として，

① 数値模型の周壁に造波点を配置し，各点の波の位

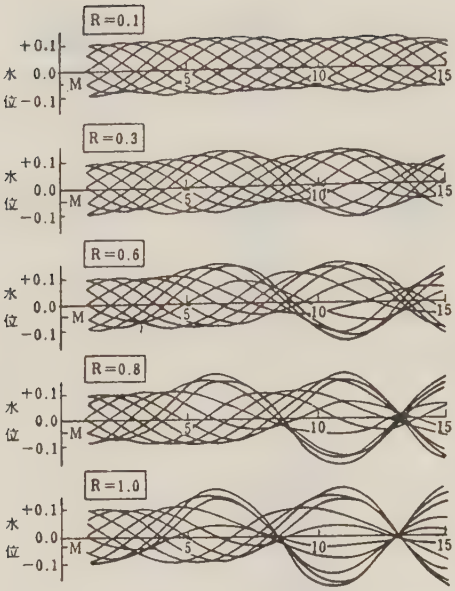


図 4-6 反射率と波形

Difference of wave profile due to reflection coefficient changing

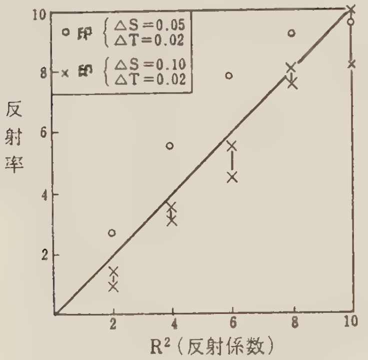


図 4-7 Rと反射率の関係

Relation between R and reflectior coefficient

相を順次ずらせる。

② 波峰線に合わせて造波点を配置する。

③ ①と②との組合せ

の3方法で造波点の位置および水位を与えた。

以上のような解析手法を組み込んで，波の平面伝達数値実験プログラムを組立てると図4-8のような流れとなる。プログラムの占有メモリーの容量は小さい方がよいが，メモリーの節約は演算時間の短縮，精度の向上あるいはプログラムの簡素化と相反することがあるが，今回は各格子につき，地盤高（水深），水位（2時点），波

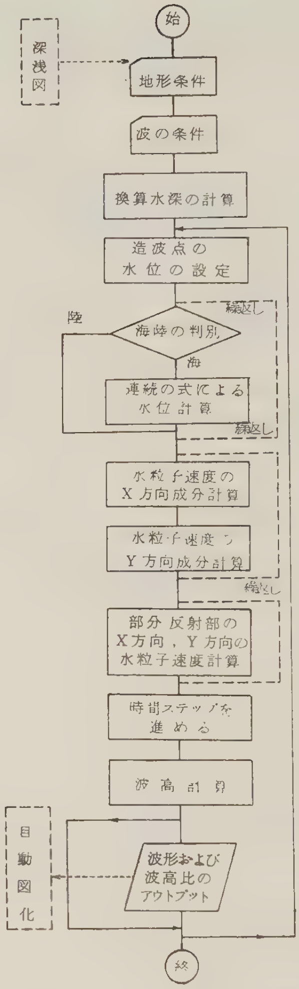

始
深浅図
地形条件
波の条件
換算水深の計算
造波点の水位の設定
陸
海陸の判別
海
繰返し
連続の式による水位計算
繰返し
水粒子速度のX方向成分計算
水粒子速度のY方向成分計算
繰返し
部分反射部のX方向，Y方向の水粒子速度計算
時間ステップを進める
波高計算
自動図化
波形および波高比のアウトプット
終

図 4-8 計算の流れの概要

Rough flow chart of the calculation

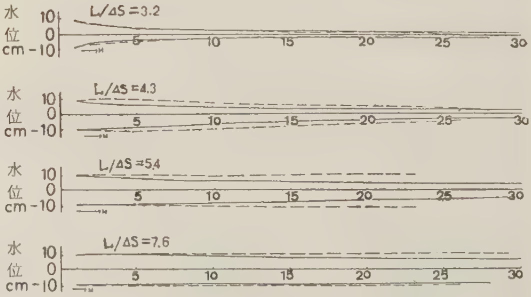


図 4-9 距離間隔と波高伝達状況

Difference of wave height profile wave height change of the 1st wave and 2nd wave conputed due to L/△S

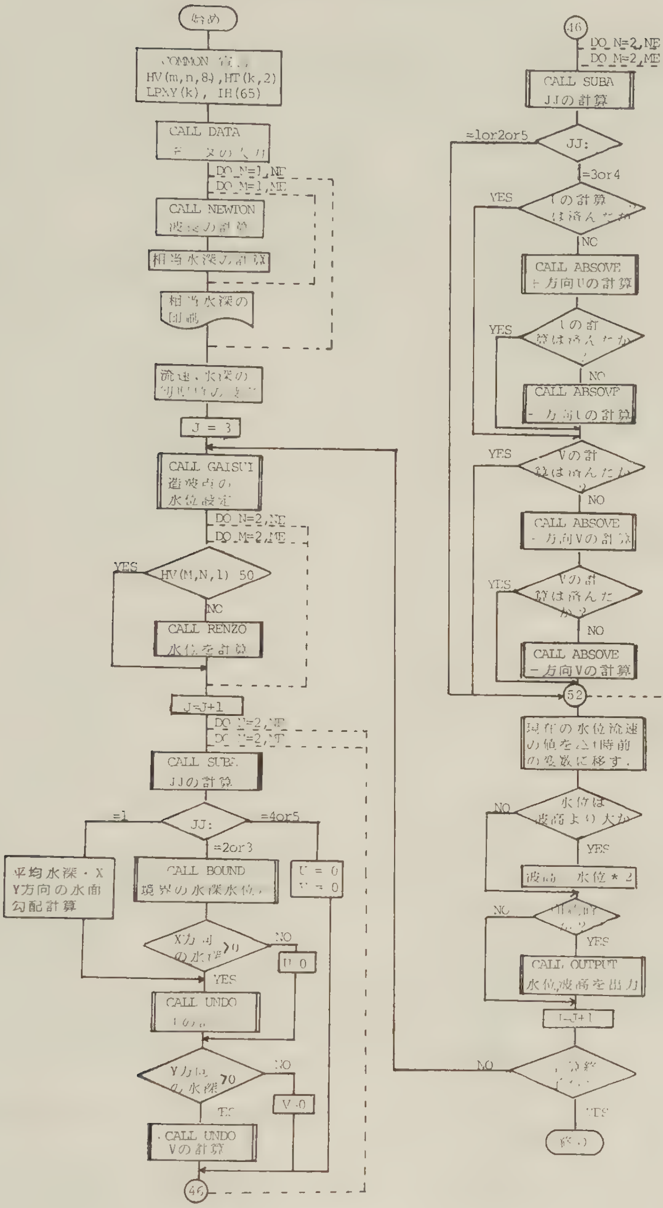

始め
COMMON 宣言
HV(m,n,8),HT(k,2)
LPXY(k), IH(65)
CALL DATA
データの入力
DO N=1,NE
DO M=1,ME
CALL NEWTON
波長の計算
相当水深の計算
相当水深の印刷
流速・水深の初期値の設定
J = 3
CALL GAISUI
造波点の水位設定
DO N=2,NE
DO M=2,ME
YES
HV(M,N,1) 50
NO
CALL RENZO
水位を計算
J=J+1
DO N=2,NE
DO M=2,ME
CALL SUBA
JJの計算
=1
JJ:
=4or5
=2or3
平均水深・X Y方向の水面勾配計算
CALL BOUND
境界の水深水位
U = 0
V = 0
X方向の水深>0
NO
U 0
YES
CALL UNDO
Uの計算
Y方向の水深>0
NO
V 0
YES
CALL UNDO
Vの計算
46
46
DO N=2,NE
DO M=2,ME
CALL SUBA
JJの計算
=1or2or5
JJ:
=3or4
YES
Uの計算は済んだか
NO
CALL ABSOVE
+方向Uの計算
YES
Uの計算は済んだか？
NO
CALL ABSOVE
-方向Uの計算
YES
Vの計算は済んだか？
NO
CALL ABSOVE
+方向Vの計算
YES
Vの計算は済んだか？
NO
CALL ABSOVE
-方向Vの計算
52
現在の水位流速の値を1時前の変数に移す．
NO
水位は波高より大か
YES
波高 水位 * 2
NO
出力時か？
YES
CALL OUTPUT
水位,波高を出力
J=J+1
NO
計算終了か
YES
終り

図 4 10　主プログラムの流れ

Flow chart of main program

高，X方向流速（2時点），Y方向流速（2時点）の計8要素を記憶し，その他命令文の部分などを合せると計算実行に必要な記憶容量は格子点数の約9倍（バイト数で約36倍）である。

4.4.2 計算メッシュと時間ステップ

計算の流速点を格子点に，水位点を格子の中央に配置したメッシュを組み，その1メッシュの大きさ（ΔS：距離間隔）について計算実行結果から検討した。その結果，図4-9に示すように，ΔSは波長の$1/8$以下とすることが望ましく，最大でも$1/_{5.4}$以下とする必要があることがわかる。この場合の波長は計算範囲内の最も短いもの，換言すれば，最も浅い所での波長をとる。

時間ステップは水位計算時点と流速計算時点とを交互に配置している。この場合，計算時間階差（Δt）は演算

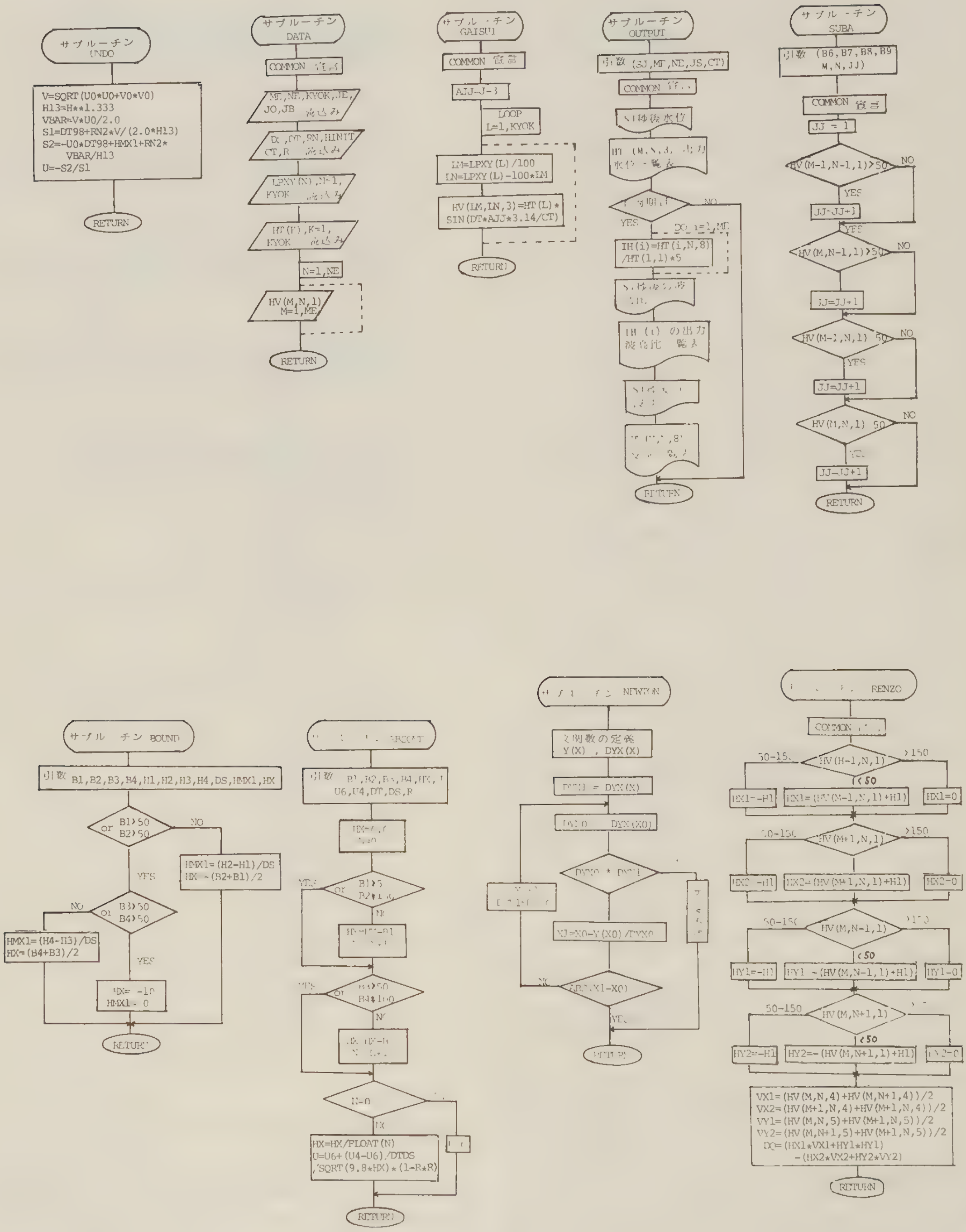

サブルーチン UNDO
V=SQRT(U0*U0+V0*V0)
H13=H**1.333
VBAR=V*U0/2.0
S1=DT98+RN2*V/(2.0*H13)
S2=-U0*DT98+HMX1+RN2*
VBAR/H13
U=-S2/S1
RETURN
サブルーチン DATA
COMMON 宣言
ME,NE,KYOK,JE,JO,JB 読込み
DX,DT,RN,HINIT,CT,R 読込み
LPXY(N),N=1,KYOK 読込み
HT(K),K=1,KYOK 読込み
N=1,NE
HV(M,N,1) M=1,ME
RETURN
サブルーチン GAISUI
COMMON 宣言
AJJ=J-3
LOOP L=1,KYOK
LM=LPXY(L)/100
LN=LPXY(L)-100*LM
HV(LM,LN,3)=HT(L)*SIN(DT*AJJ*3.14/CT)
RETURN
サブルーチン OUTPUT
引数 (JJ,MT,NE,JS,CT)
COMMON 宣言
YES
NO
DO i=1,ME
IH(i)=HT(i,N,8)/HT(1,1)*5
IH (i) の出力 波高比 一覧表
RETURN
サブルーチン SUBA
引数 (B6,B7,B8,B9 M,N,JJ)
COMMON 宣言
JJ = 1
HV(M-1,N-1,1)>50
NO
YES
JJ=JJ+1
HV(M,N-1,1)>50
JJ=JJ+1
HV(M-1,N,1) 50
JJ=JJ+1
HV(M,N,1) 50
JJ=JJ+1
RETURN
サブルーチン BOUND
引数 B1,B2,B3,B4,H1,H2,H3,H4,DS,HMX1,HX
B1>50 or B2>50
NO
YES
HMX1=(H2-H1)/DS
HX=(B2+B1)/2
B3>50 or B4>50
HMX1=(H4-H3)/DS
HX=(B4+B3)/2
HX=-10
HMX1=0
RETURN
サブルーチン ABCUT
引数 B1,B2,B3,B4,HX,U6,U4,DT,DS,R
B1>5 or B2>100
YES
NO
B3>50 or B4>100
N=0
HX=HX/FLOAT(N)
U=U6+(U4-U6)/DTDS
/SQRT(9.8*HX)*(1-R*R)
RETURN
サブルーチン NEWTON
関数の定義
Y(X) , DYX(X)
DYX1 = DYX(X)
DYX0 DYX(X0)
DYX0 * DYX1
X1=X0-Y(X0)/DYX0
ABS(X1-X0)
NO
YES
RETURN
サブルーチン RENZO
COMMON 宣言
50-150
HV(M-1,N,1)
>150
<50
HX1=-H1
HX1=(HV(M-1,N,1)+H1)
HX1=0
HV(M+1,N,1)
HX2=-H1
HX2=(HV(M+1,N,1)+H1)
HX2=0
HV(M,N-1,1)
HY1=-H1
HY1=-(HV(M,N-1,1)+H1)
HY1=0
HV(M,N+1,1)
HY2=-H1
HY2=-(HV(M,N+1,1)+H1)
HY2=0
VX1=(HV(M,N,4)+HV(M,N+1,4))/2
VX2=(HV(M+1,N,4)+HV(M+1,N,4))/2
VY1=(HV(M,N,5)+HV(M+1,N,5))/2
VY2=(HV(M,N+1,5)+HV(M+1,N,5))/2
DQ=(HX1*VX1+HY1*VY1)
-(HX2*VX2+HY2*VY2)
RETURN

図 4-11 副プログラムの流れ

Flow chart of sub program

の安定性から(4-18)式により求まる。

$$\Delta t \leqq \frac{\Delta S}{\alpha c} \qquad \cdots\cdots(4\text{-}18)$$

ここに，α は係数であり，一般に1.3位を用いればよい。c は波速である。この場合の波速は最も速いもの，換言すれば，模型内で最も深い所での波速を用いる必要がある。

4.4.3　プログラムの流れと記号

計算に必要な記憶しておくべき水位点および流速点の諸量は次のとおりである。

記号 プログラム	説明
ME　NE	横および縦方向の格子点数
KYOK	波高を与える（造波）地点数
JE	（計算終了の計算回数）×2
JO	印刷間隔（*JO*／2回の計算ごとに印刷）
JB	（結果の印刷回数）×2
DT	時間階差＝△t（単位：秒）
DS	格子の距離間隔＝△t（単位：m）
RN	マンニングの粗度数＝n
CT	波の周期
R	反射率に関する係数
LPXY(I)	造波地点の座標
HT	造波地点の半波高
Y(X)	文関数：根を求める方程式＝y(x)
DXY(X)	〃　：x点の微係数＝△y／△x
X1	新しい近似値
AJJ	計算回数×2
LM	造波地点の横座標
LN	〃　縦座標
H1	計算地点の水深
HX1，HX2	水位計算点の回りの左右の格子線上の水深
HY1，HY2	〃　上下　〃
VX1，VX2	X方向からの流入流出速度
VY1，VY2	Y方向からの　〃
DQ	時間階差内の流入量
UO，VO	計算方向およびそれと直角方向の△t時前の流速
U	新しく求めた流速
B1，B2，B3，B4	流速計算点の回り4点の地盤高
H1，H2，H3，H4	流速計算点の回り4点の水位
HMX1	水位コウ配
HX	流速計算点の平均水深
SJ	経過時間（単位：秒）
U4	海側の点の△t時前の流速
U6	海側の点の計算時点の流速

表 4-1　プログラムの変数の説明

Explanation of variables used in the program

(イ)　水位点では

水深（海陸の判別含む）　：HV（M, N, 1）
Δt 以前の水位　：HV（M, N, 2）
現時点の水位　：HV（M, N, 3）
波高（最高又は最低水位）：HV（M, N, 8）

(ロ)　流速点では

Δt 以前の X 方向流速　：HV（M, N, 4）
Δt 以前の Y 方向流速　：HV（M, N, 5）
現時点の X 方向流速　：HV（M, N, 6）
現時点の Y 方向流速　：HV（M, N, 7）

以上の8要素である。なお，水位点での単位は**m**，流速点での単位は m/s とする。

表4-1にプログラムで使った記号の説明を示し，図4-10および図4-11には前述の流れ図の詳細な組立て方法を示している。

4.5　波の変形に対する基本的検討

4.5.1　波の浅水係数

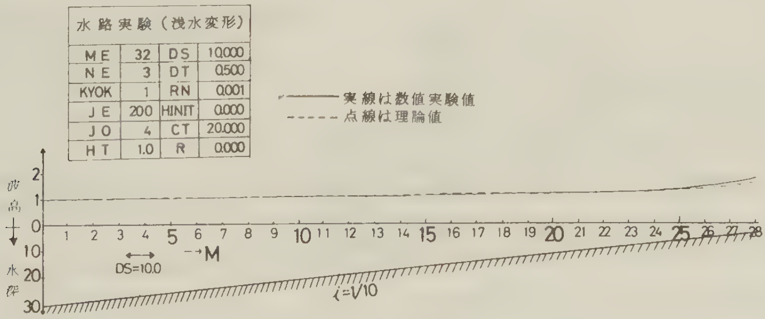
深水域で波高 H_0 の波が水深 h の浅水域へ進んだとき，微小振幅波の理論によると，波高は，群速度の比の平方根に逆比例し，次式で表わされる。

$$H=\sqrt{\frac{1}{2n}\cdot\frac{C_0}{C}}\cdot H_0=K_S\cdot H_0 \qquad \cdots\cdots(4\text{-}19)$$

ただし，

$$n=\frac{1}{2}\left[1+\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)}\right]$$

この K_S は浅水係数と呼ばれる。n は波の群速度(C_G)と波速(c)との比である。ところが，ここで仮定している様な長波の場合は，群速度と波速が等しくなるため $n=1$ である。従って，長波の波高 H^* と浅水波の波高 H との比は次式で表わされる。



水路実験（浅水変形）			
ME	32	DS	10.000
NE	3	DT	0.500
KYOK	1	RN	0.001
JE	200	HINIT	0.000
JO	4	CT	20.000
HT	1.0	R	0.000

図 4-12　水深による波高変化

Comparison of wave height change by Ary wave theory (line) and one by the nemerical model proposed (dot-line)

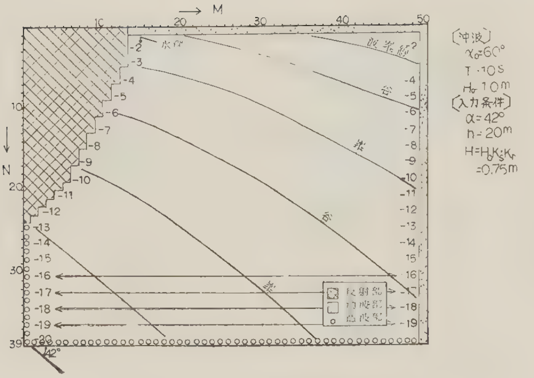


図 4-13　波の屈折実験模型

Numerical model concerning about wave refraction

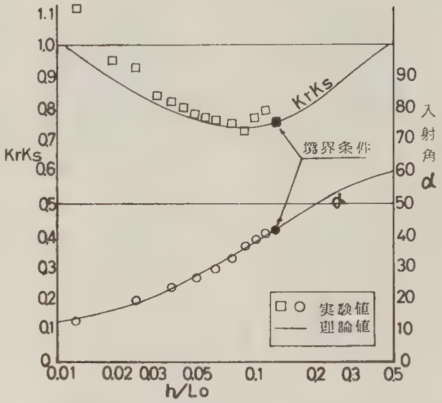


図 4-14　屈折後の波高比と波向き

Computed results of wave height ratio and direction after refraction

$$\frac{H}{H^*}=\sqrt{\frac{1}{n}} \quad \cdots\cdots(4\text{-}20)$$

たとえば，$h/L=0.09$ のところでは，

$$n=\frac{1}{2}\left[1+\frac{1.17}{1.45}\right]=0.90$$

となり，これより浅い水域ではnを1とみなしても誤差は1割以下にとどまる。この時，波高の誤差も式(4-20)より約5％となる。

また，水深 h_1 から水深 h_2 へと波が進んだ場合の波高変化は式(4-21)となる。

$$\frac{H_2}{H_1}=\sqrt{\frac{n_1}{n_2}}\cdot\frac{H_2^*}{H_1^*} \quad \cdots\cdots(4\text{-}21)$$

ここに，H_1, n_1 および H_2, n_2 は，水深 h_1 および h_2 での波高およびn値である。従って，ある水深の区間で用いれば波高の誤差は小さくできる。図4-12にはこのプログラムにより計算した波高の水深変化を実線で示し，式(4-19)から計算した波高変化を破線で示して比較している。

4.5.2　波の屈折

波速は水深により変化するため，等深線に対し斜めに入射する場合，波は屈折現象を起こす。この状況を数値実験した結果を図4-13に示す。この図では約1/10の海底勾配のところに沖波方向 60° の角度で周期10秒の波が進入する数値模型を示す。この場合，$\Delta S=5m$，$\Delta t=0.25$ 秒とした。また同図には実験結果から得られた等波峯線も併記した。

図4-14は入射波高の比($K_r \times K_S$) 及び入射角 d について数値模型実験により得られた結果と理論値を比較たしものである。ただし，実験値の波高比は出力結果を式(4-20)で補正した結果を用いた。

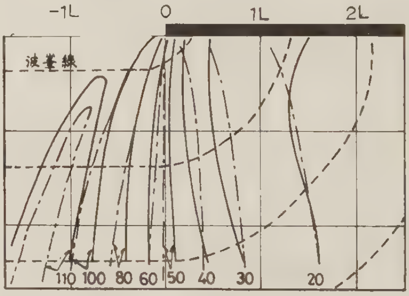


図 4-15　半島堤からの回折

Computed results of the diffraction coefficient for a semi-infinite breakwater

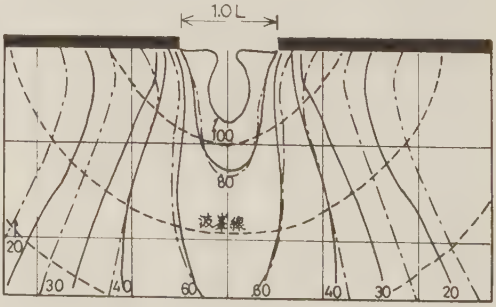


図 4-16　開口部からの回折

Computed results of the diffraction coefficient for a breakwater gap

同図より，波向は理論値とよい一致を示している。

又，波高比は浅い方から3点だけ，隔りがやや大きい。これは上端の消波壁よりの反射がわずかに残った可能性がある。

4.5.3 波の回折

防波堤背後の回折係数を図4-15，図4-16にパーセントで示す。図4-15は半島堤，図4-16は防波堤開口部（$B/L=1.0$）でかつ，波が防波堤に直角に入射する場合の図である。この計算値を検証するため，Penny & Price の回折理論に基づく計算法による値を図中に1点鎖線で示した。以上の図は水深 $5.0m$，$\Delta S=6.76m$，$\Delta t=0.5S$，$H=1.0m$，$T=10.0S$ の条件のもとで数値実験を行ったものである。

回折に関する数値実験結果は，半島堤の場合及び開口部の場合とも理論値に近い値を示していると言える。

4.6 数値模型実験の適用

4.6.1 港内静穏度数値実験の計画方法

(1) 数値模型の範囲

数値模型に含める平面的な範囲を設定する場合，波高を求めたい区域とそれに大きく影響する範囲にある程度の余裕を考える必要がある。たとえば模型中に人工的な境界を設けた場合，それによる波の乱れが生ずるので，½波長程度の余裕幅を置いて境界を配置しなければならない。造波点から波高観測点までの距離は反射を考慮すると，ふつう1波長以上必要である。

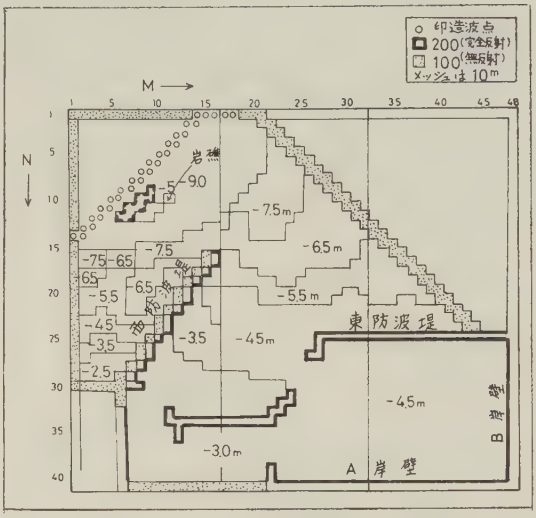


図 4-18 由良漁港地形データ

Depth data of numerical model in Yura Fishing Port

(2) 実験に必要なデータ

漁港の数値模型実験を行うには，水理模型実験と同様に，基礎データとして平面図（$^1/_{3,000}$程度の深浅図），実験波の諸元（波向，波高，周期），実験潮位，水陸境界部の反射率，海底摩擦係数などが必要である。これらのデータを基に，地形をデジタル化するための計算格子距離間隔は模型の範囲で最も浅い所での波長の約⅛以下とすることが望ましいが，砕波する部分や余りに浅い部分は，模型で陸地とみなして除外する必要がある。

ΔS を以上のように決めた場合，計算時間階差は実験

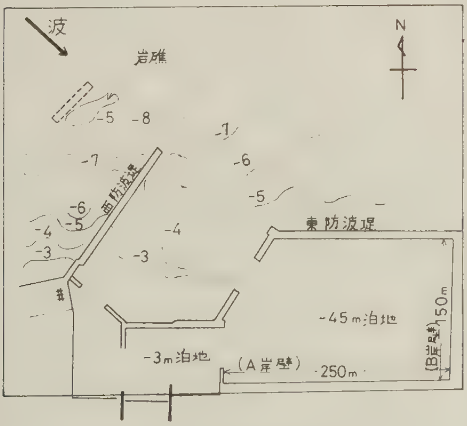


図 4-17 由良漁港計画平面図

Plan of Yura Fishing Port

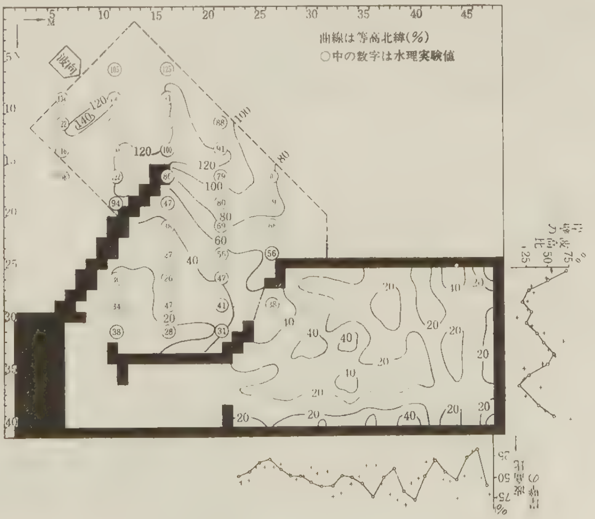


図 4-19 数値実験より得た波高分布

Wave height distribution computed by numerical model

範囲の最深部の波速により式(4-18)で決定されるが，演算回数を減らすため，Δt は大きい方が良く，かつ1周期ごとの波高計算のため周期の整数分の1とする。

4.6.2　由良漁港整備計画に関する数値模型実験

この実験では外防波堤からの回折と，泊地内の反射の問題をとりあげ，先に行われた水理実験[61]と比較した。

計算条件は以下のとおりである。

（1次データ）

- 波：波向NW，周期10秒，波高3m
- 潮位：+1.0m
- 地形：図4-17

（2次データ）

- メッシュ間隔(ΔS)：10m
- 計算時間間隔(Δt)：0.5秒
- メッシュ数（ME×NE）48×41
- 実験継続時間：120秒
- 入力地形：図4-18，海底は深さ1m毎のステップ状とする。消波工部及び斜路部は無反射，直立防波堤及び直立岸壁部は完全反射とする。境界部も無反射とする。
- 造波地点：図4-18中の◯印位置

図4-19は計算結果の1例を示す。この図の泊地外の波高比は第1波目をとらえ，泊地内については泊地に波が侵入後120秒後の波高比を示す。外防波堤周辺について水理模型実験と数値模型実験を比較するとよく近似しており，その差は10%以内である。泊地についても岸壁部の波高分布で比較すると，よく近似していることがわかる。この模型のメッシュ数は約2,000で，実験の演算時間は OKITAC 50/40 を使用して23分であった。そのほか，沖に島堤を設けたケースや岸壁を消波構造としたケースの数値実験も行い良い結果も得ている。

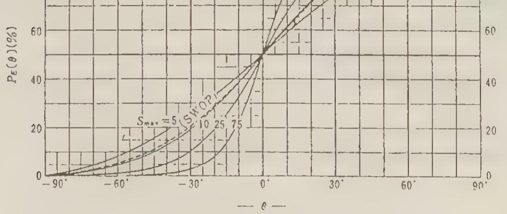


図 5-1　波エネルギーの方向累加曲線[68]

Acumulative directional distribution of wave energy

4.7　まとめ

この数値模型実験は長波の数値解析を微小振幅波（浅水波）の数値解析に改良し，さらに一般的な波の平面実験に適用できるよう発展させたものである。この実験結果と水理実験結果とを比較した結果，この実験法は一般的漁港の波の伝達に関する全般的問題に適用できることがほぼ確認された。

数値実験を実用化するにあたっては，反射率の導入，電算機メモリー容量の節約，波の条件の任意設定，結果の自動図化などの配慮を行ったが，さらに透過堤に対して適用するなど実用範囲を拡げるための改良をすべく検討中である。

5.　波高推定手法の不規則波への拡張

5.1　不規則の基本的性質

現実の波浪は，以上述べてきたような規則的な周期波ではなく，その波高のみならず，周期および波向きも1波1波異なる波である。従って港内に伝わる波についても波の不規則性を考慮する必要がある。

この不規則な波を表現する方法として，スペクトル法とゼロアップクロス法とに大別できる。前者は波形を表現するものであり，Bretschneider[63]や光易[64]の研究（式(5-1)）による1次元スペクトルが著名である。

$$W(f)=\left[8.58\times10^{-4}\left(\frac{gF}{u^2_*}\right)^{-0.312}\right]g^2f^{-5}$$

$$\cdot\exp\left[-1.25\left(\frac{gF}{u^2_*}\right)^{-1.32}\left(\frac{u_*f}{g}\right)^{-4}\right] \quad \cdots\cdots(5\text{-}1)$$

$W(f)$：1次元スペクトル

g：重力の加速度，F：吹送距離

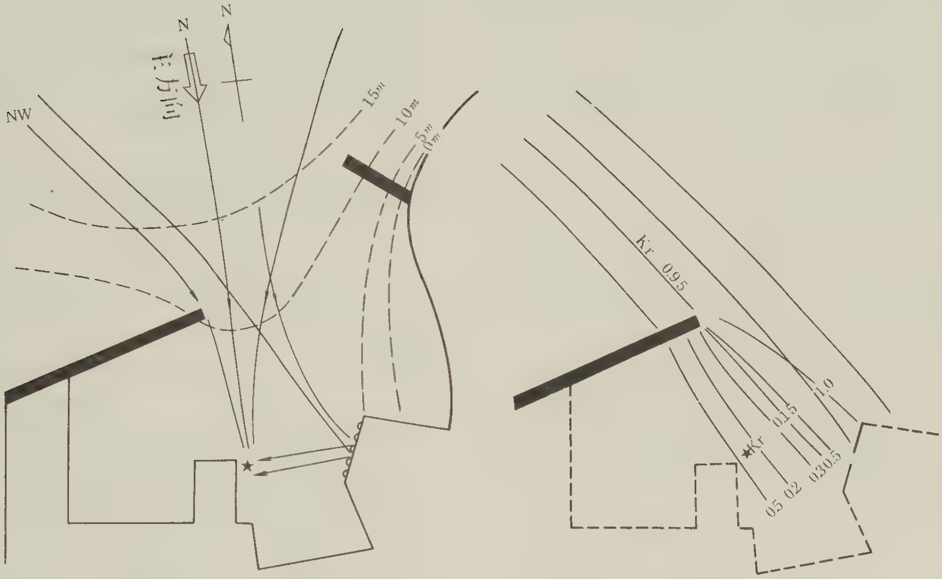
表 5-1　不規則波高の計算表　（$H_0/L_0=0.04$）

Table used in computaion of ocean wave height

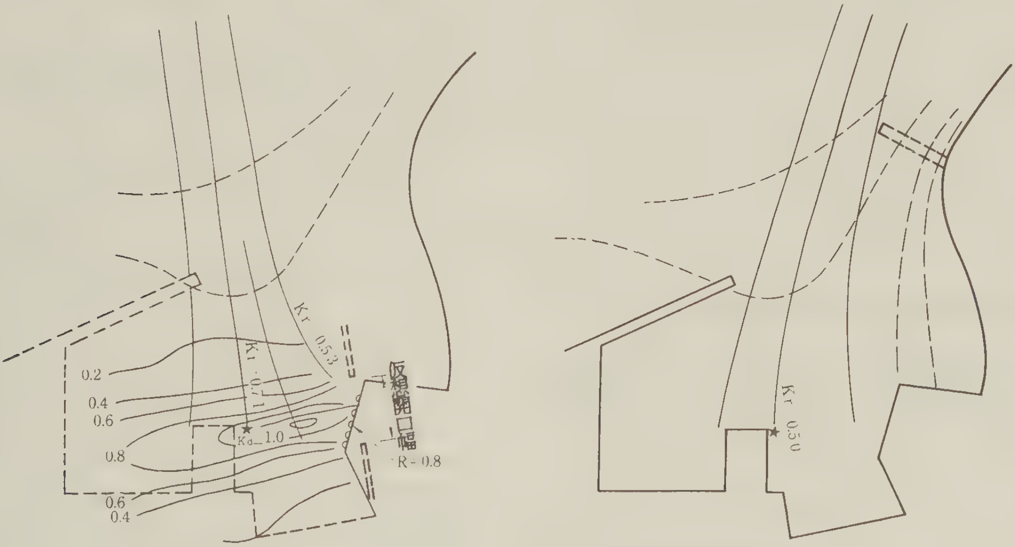
波向	主方向となす角	D_i	屈折・回折波			1次反射波			
			K_r	K_d	$D(K_rK_d)^2$	K_r	K_d	R	$D(K_dK_dR)^2$
NW	−45°	0.26	0.95	0.17	0.007	0.80	1.0	0.8	0.106
N	0	0.48	0.71	1.0	0.242	0.53	1.0	0 8	0.085
NE	−45°	0.26	0.50	1.0	0.065				
計			／	／	0.314	／	／	／	0.192

$H_{eff}=\sqrt{0.314+0.192}\times4.0\text{m}\times1.02\div2.90\text{m}$

注）　$h=6.0\text{m}$，$H_0=4.0\text{m}$，$L_0=100.0\text{m}$


N
N
主方向
NW
15m
10m
5m
0m
Kr 0.95
1.0
0.15
Kr
0.5 0.2 0.3 0.5

a）N 方向沖波の要素波の波向線　　b）N W波の屈折・回折


0.2
0.4
0.6
0.8
0.6
0.4
Kr 0.71
Kr 0.53
Kd 1.0
仮想開口幅
R=0.8
Kr 0.50

c）N波の屈折・反射　　d）N E波の屈折

図 5-2　不規則波の算定例

Illust of computation methods of ocean wave height

u_*：風の摩擦速度，f：周波数

本来のエネルギースペクトルは周波数と波の進行方向の関数として与えられるべきものであるが，それらが互に独立と考えると式（5-2）が成り立つ。

$$W(f,\theta)=W(f)\cdot G(\theta) \qquad \cdots\cdots(5\text{-}2)$$

ここに，

$W(f\cdot\theta)$：2次元スペクトル

$G(\theta)$：方向分布関数

波エネルギーの方向分布関数としては，初め，Pierson-Neuman-James65) により単一形状の密度関数が発表された。最近の研究では，方向分布関数は波の発達の程度により異なることがLonguet-Higgins66)，光易らにより報告されている。光易ら67)の方向分布関数は $G(f,\theta)$ となっているが，合田ら68)はこの方向分布関数から周波数fについて積分し，$G(\theta)$の形に単純化して実用計算に用いることを提案している。この分布形の累加曲線を図5-1に示す。

ゼロアップクロス法の場合，水位ηが平均水位を下から上へ横切ってから次に再び下から上へ横切るまでを1波とみなし，その時間間隔を周期T，その間の最高点と最低点との差を波高Hとした。これらの波高や周期は1波1波異なり，波高分布は式(2-11)で示されるレイリー分布を，また，周期の2乗も同じ分布形を示すことが一般に知られている。

スペクトル幅が小さいとき，代表波高とエネルギーEとの間には次の関係がある。

$$\left.\begin{aligned} H_{1/10}&=5.09\sqrt{E}\\ H_{1/3}&=4.00\sqrt{E}\\ \bar{H}&=2.51\sqrt{E}\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(5\text{-}3)$$

5.2　不規則波による水面変動の予測

漁港内の水面変動を予測する場合，波の不規則性を考慮すれば現実の状況により近くなる。これを考慮した算定方法として，合田68)は方向別周期別に所定のエネルギー率をもった波の変形を算定し，それぞれの変形後の波高よりエネルギー和を求め，不規則波の波高を算定する方法を提案した。すなわち，周期をエネルギー量が各区間ごとに等しくなるように分割し，さらに，波向は8方位又は16方位に等分割して周期，方向別にエネルギーを割りふった。

この方法を用いて，屈折後の不規則波については，それぞれの周期別波向き別の単一波の屈折係数K_rを求め，これらのエネルギーにより加重平均して不規則波の屈折係数を求めている。

また合田は回折係数についても，同様な手法で求めた不規則波の回折図を用意しており回折係数はこの図より読取ることを提案している。従って，不規則波の港内波高は（反射がない場合）次式で算定される。

$$H_{eff}=(Kr)_{eff}(Kd)_{eff}(Ks)_{eff}\,H_0 \qquad \cdots\cdots(5\text{-}4)$$

ここに，

H_{eff}　：不規則波の港内波高

H_0　：不規則波の沖波波高

$(Kr)_{eff}$：不規則波の屈折係数

$(Kd)_{eff}$：不規則波の回折係数

$(Ks)_{eff}$：不規則波の浅水係数

この方法を漁港内の波高算定に用いる場合，次の点で問題が残る。

① 屈折後の波の方向分布は方向集中度が変るばかりでなく，その分布形が歪んでくる。合田の方法では，回折係数を求める場合，この歪は無視されている。さらに，漁港では防波堤を互い違いに左右から出す方法が多いので不規則波回折図の適用が制約される。

② 水理模型実験（波向きの変化を出せない不規則波実験も含む）では，この方法を採ることはなく，波の変形は屈折，回折，浅水変形まで一貫して実験する。

これに対し，著者は，

① 波高算定のための作業量を極力少なくし，そのための精度の低下を小さくする。

② 回折においては，波の散乱の影響よりも入射する成分波の波向きの影響が大である。

③ 模型実験による方法と整合をとる。

ことを念頭に置き，次の様な算定方法を提案している。

不規則波の波高算定は，その成分波（規則波）で屈折計算から回折，反射まで一貫して計算し，方向別のエネルギーを合成する方法を採る。すなわち，式（5-5）による。

$$H_{eff}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}D_i(K_{ri}K_{di})^2+\sum_{i=1}^{n}D_i(K_{ri}\cdot K_{di}\cdot R_i)^2}\times H_0\times K_S \qquad \cdots\cdots(5\text{-}5)$$

ここに，

D：沖における方向別エネルギー割合

n：方向分割数

R：反射率

この際，周期の分割は行わず有義波周期で代表させる。この省いた理由は，周期まで分割すると作業量が数倍となる反面，周期の影響は波向き分布に比べ一般に小さく又，結果としての周期の算定には実用的に波高程の精度は要求されないと考えたからである。

次に，この方法による計算例を示す。図5-2の星印の地点（$h=6.0$m）に主方向Nの波（$H_0=4.0$m，$L_0=100$

m）が来襲した場合を想定する。同図のａ)では，方向分割数を３とし，N波のほかに，NWとNEの成分波を考慮し，その波の変形を調べると，NW波は屈折×回折と屈折×反射，N波は屈折と屈折×反射，NE波は屈折のみを図のｂ)～ｄ)のような解析方法を用いて算定する。そのエネルギーの和を求めるための計算表が5-1である。

以上のような方法で実際の港内の水面変動に近い予測が可能であろう。

6. 結　言

本論文は漁港港内の水面変動，すなわち，波浪や数分単位の長周期による水面の動揺について，その予測手法を調べたものである。

第１章に述べた通り，港漁は種々の条件下に建設されているが，漁港の役割上から港内の動揺を抑えることが必須条件となっており，このために建設費の約７割を防波堤につぎ込んでいる現状である。従って，この効果を数量的に算出して比較する手法が必要である。

ここでは，次章以下の３つの手法の概略を述べ，その適用条件や改良部について述べた。

第２章では，基本的推算方法として，波の変形を伴って，屈折，回折，浅水変形などの理論を段階的に継なぎ合わせ波の諸元を求める方法を紹介した。さらに下記項目について改善を行った。

① 砕波前から砕波後に至る波高の浅水変化を連続的に求めた。

② 砕波帯内に位置する直立防波堤上の越波による伝達波高を実験的に求め，予測式をたてた。

③ 二重回折波の波高分布を実験的に求めた。

④ 漁港内の長周期の実態を捉え，これが波浪に起因し数値実験により，ある程度の予測は可能であることを示した。

第３章では，漁港港内の静穏度を求めるための標準的な水理模型実験手法の指針を提示した。すなわち，漁港の実験を行う際の相似律の問題，実験施設，計測装置，模型製作，実験の実施方法および具体的実験の実施例についてのべた。

この水理模型実験は，労力，経費，時間も要するが，３つの手法の中で最も精度の高いもので，波の状況を全般的に観察できる最大の利点をもっている。また，数値模型実験と比べ，平面的実験範囲が非常に大きい場合や波の周期が小さい場合は経済的にも有利となる。さらに，砕波の問題は今のところ数値実験は適用できない。

第４章では，著者が開発した波の伝達の数値実験手法について紹介した。すなわち，差分法を用いた長波のシミュレーション方法に，波速の浅水波補正，波の任意反射率の導入，波の条件（波向，周期，波高）設定などの改良を行い，汎用的なプログラムを完成した。この手法は，島影の波高推定のように屈折と回折が同時に生じる場合や，港内岸壁部の波高分布のように反射が繰返され，位相の異なる波が重合する場合に適しており，これは，基本的な屈折，回折，反射の重ね合せで解き得ない問題である。

第５章では，上記の３手法にて，求めた規則波推定値から，新しく不規則波の波高を推定する方法を提案した。まず，不規則波の概念を紹介し，次に成分波の波向きを重視した波高の推定方法について述べている。

以上述べたように，港内の静穏度の確保は重要であり，その予測方法のうち，どの方法を選ぶかは，現地の自然条件（海底地形の複雑さ，波の周期，波高，波向）や漁港の利用条件，漁港施設の規模及び予測の必要精度等を勘案して決定することが必要である。

謝　辞

本研究は著者の所属した農業土木試験場水産土木第２研究室及び水産工学研究所漁港水理研究室が経常試験費，漁港施設調査費並びに受託研究費によって行った試験研究のなかで得られたデータをとりまとめたものである。

この研究の機会をお与え頂き，かつ，終始御指導を頂いた菅原輝男前室長，杉江正文前々室長，並びにご援助を頂いたもと研究員の長野章氏，篠田邦裕氏，影山智将氏，西裕司氏と現研究員の伊藤勝一氏に，心から感謝の意を表します。

また，本研究をまとめるにあたり，懇切に御指導を賜った九州大学田中宏平教授，佐賀大学戸原義男教授並びに，九州大学四ヶ所四男美教授，また，有益なご批判，御指導を賜った九州大学西澤正久教授に深い感謝の意を表します。

参考文献

1） たとえば，Lamb, H.: Hydrodynamics, pp. 4-6, 6th ed., Dover, 1938.

2） Laitone, E. V.: The second approximation to cnoidal and solitary waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 9, pp. 430-444, 1961.

3） 岩垣雄一：クイド波に関する研究（第４報）―Hyperblic waveについて(1), 京大防災研年報第10号B，pp. 283-294, 1967.

4） Munk, W. H.: The solitary wave theory and its application to surf problems, annals New York Academy of Science, Vol. 51, Art. 3, pp. 376-424, 1949.

5） 首藤伸夫：非線形長波の変形，水路幅，水深の変化する場合，第21回海岸工学講演会論文集， pp. 57-63, 1974.

6） Michell, J. H.: The highest waves in water, phil, Mag., Vol 36, pp. 430-437, 1893.

7） Mc Cowan, J.: On the Highest Wave of Permanent Type, Philos, Magazine and Journal of Science, Vol. 38, 1894.

8）Iversen, H. W.: Waves and breakers in Shoaling water, Proc. 3rd Conf. Coastal Eng., Berkley, pp. 1-12, 1952.

9） 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集第180号，pp. 39-49, 1970.

10） Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart: Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beats," J. Fluid Mech. 13, pp. 481-504, 1962.

11） 佐々木幹夫・佐伯　浩：砕波後の波の変形に関する実験的研究(2)，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 39-44, 1974.

12） 中村充・白石英彦・佐々木泰雄：砕波による波の変形に関する研究，第13回海岸工学講演会講演集，pp. 259-262, 1966.

13） Penny & Price: "Diffraction of sea waves by breakwaters" Artiffical Harbours, Dire Mise. Weapon Develop. Tech. His. No. 26, 1944.

14） Jeffreys: Note of the offshore bar problem and reflection from a bar, Grt. Brit. Minis. Supply, Wave Report 3, 1944.

15） Johnson, J. W., R. A. Fuchs and J. R. Morison: Damping action of submerged breakwater, Trans. A. G. U, Vol. 32, No. 5, 1951.

16） 近藤俶郎・佐藤功：防波堤天端高に関する研究，北海道開発局土木試験所月報第117号，pp. 1-5, 1963.

17） 合田良実・竹田英章：越波による防波堤背後への波高伝達率，第13回海岸工学講演会講演集，pp. 87-92, 1966.

18） 16)に同じ

19） 篠田邦裕・山本正昭：越波による港内伝達波に関する実験的研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 406-409, 1980.

20） 首藤伸夫：消波ブロックの抵抗について，第16回海岸工学講演集，pp. 259-262, 1969.

21） 沼田淳：ブロック堤の消波効果に関する実験的研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 501-505, 1975.

22） 三浦晃・遠藤茂勝：ブロック積傾斜防波堤の波高伝達率に関する実験的研究，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 129-133, 1976.

23） 佐藤昭二・合田良実："海岸・港湾"，彰国社，pp. 22-77, 1972.

24） Miles, J. and W. H. Munk: Harbor Paradox, Proc. A. S. C. E., Vol. 87, No. WW 3, pp. 111-130, 1961.

25） Le Méhauté, B. L.: Theory of wave agitation in harbor, Proc. A. S. C. E., Vol. 87, No. HY 2, pp. 31-50, 1961.

26） 宇野木早苗：港湾のセィシュと長周期波について，第6回海岸工学講演会講演集，pp. 1-11, 1959.

27） 合田良実：浅海域における波浪の砕波変形，港研報告14巻3号，pp. 59-106, 1975.

28） 27)に同じ

29） Bowen, A. J., D. L. Inman and V. P. Simons: Wave set-down and set-up, J. Geophys. Res. 73, pp. 2569-2577, 1968.

30） 菅原輝男・神瀬哲：砕波による港内水位の上昇および港内水位の振動特性に関する研究，農業土木試験場報告第14号，pp. 145-182, 1976.

31） たとえば，水理公式集，土木学会編，昭和46年度版，pp. 479-480.

32） Munk, W. H.: Surf beats, Trans. A. G. U., Vol. 30, pp. 849-854, 1949.

33） 27)に同じ

34） 合田良実・永井康平：波の統計的性質に関する調査解析，港湾技術研究所報告第13巻1号，pp. 3-37, 1974.

35） 大野正夫・入江功・大堀晃一：現地観測による波の変形，第21回海岸工学講演会論文集， pp. 13-17 1974.

36） 全国漁港協会編：漁港構造物標準設計法，1976年改丁版，p. 8, 1976.

37） 10)に同じ

38） 三井宏・筒井茂明・亀川和正：埋立地造成に伴ううち上げ高，沿岸流の変化(第2報)，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 127-134, 1973.

39）11)に同じ

40）菅原輝男・山本正昭：規則波の浅水変形モデル，農業土木試験場技報D20号，pp. 1-21，1978.

41）山本正昭・菅原輝男：不規則波の浅水変形—レーリー分布の場合，農業土木試験場技報D20号，pp. 23-52，1978.

42）菅原輝男・田中潤児：港口形状と波の遮蔽効果との関係，農業土木試験場報告，14号，pp. 183-199，1976.

43）合田良実・吉村知司・伊藤正彦：島堤による波の反射および回折に関する研究，港湾技術研究所報告第10巻2号，pp. 3-52.

44）堀川清司：海岸工学，東京大学出版会，p. 155，1973.

45）高橋智晴ほか：波浪に関する拠点観測年報（昭和53年），港湾技術資料，No. 332，1980.

46）杉江正文・神瀬哲：消波岸壁の配置に関する研究　農業土木試験場技報D15号，pp. 1-38，1974.

47）Hidaka, K., Terada, T., Yoshida, Y. and D. Ishitani : Secondary unduration of oceanic tides, Jour. College of sience, Univ. of Tokyo, Vol. XXIV, 1943.

48）西村源六郎・高山威雄・金井清：湾口における水位変動に伴う湾内海水運動(2)，地震研究所彙報13号の1，1935.

49）野満隆次・岡本願次郎：湖海の棚振動存立条件とMerian 周期の補正(2)，地理物理，第4巻2号，1940.

50）Lee, J-J : Wave induced oscilations in harbors of arbitrary shape, Jour. Fluid Mech., Vol. 45, No. 2, pp. 375-394, 1969.

51）岩垣雄一・椹木亨：海岸工学，初版，共立出版株式会社，p. 401，1979.

52）Diephuis, J. G. H. R. : Scale Effet Involving the Breaking of Waves, Proc. 6 th Conf. on Coastal Eng., 1958.

53）山本正昭：直立消波工の波圧減殺効果に関する基礎的実験，水産工学研究所報告第3号，pp. 101-126，1982，

54）石田昭・高橋宏直・金沢和幸：数値解析による浅海波の変形特性—波数周波数スペクトルとバイスペクトルによる検討—第27回海岸工学講演会論文集，pp. 20-24，1980.

55）合田良実・鈴木康正・岸良安治：不規則波浪実験とその特性，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 237-242，1974.

56）合田良実・竹田英章・菊谷徹：防波堤所要天端高に関する実験(1)—直立堤の越波による伝達波高—，第2回港湾技術研究所研究会講演概要，pp. 1-7，1964.

57）白石英彦：複雑な平面地形における平面流の不定流解析，農業土木試験場技報F7号，1972.

58）伊藤喜行・谷本勝利：数値波動解析法とその応用—構造物周辺の波—，第18回海岸工学講演会論文集，1971.

59）伊藤喜行・谷本勝利：波向線交差領域での波の屈折—数値波動解析法の応用(2)—，第19回海岸工学講演会論文集，1972.

60）山本正昭・長野章：微小振幅波の平面伝達に関する数値解析，農業土木試験場技報D15号，1974.

61）株式会社日本港湾コンサルタント：由良漁港水理模型実験，1973.

62）菅原輝男・山本正昭・長野章：微小振幅波の平面伝達に関する数値解析（II），農業土木試験場技報D第17号，1975.

63）Bretschneider, C. L. : Wave variability and wave spectra for wind generated gravity waves, Beach Erosion Board Tech. Memo. No. 118, 1959.

64）光易恒：風波のスペクトルの発展(2)，第17回海岸工学講演会論文集，1970.

65）Pierson, W.J., Neumann, G. and R.W. James : Practical methods for observing and forcasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. H.O. Publ. 603, U. S. Navy Hydrographic Office, 1955.

66）Longuet-Higgins, M. S., Cartwright, D. E. and N. D. Smith : Obserbations of the directional spectrum of sea waves using the motion of the floating buoy, Ocean Wave Spectra, Prentice Hall, Englewood Cliffs pp. 111-131, 1963.

67）Mitsuyasu, H. et al : Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, Jour, Physical Oceanography, Vol. 5, pp. 750-760, 1975.

68）合田良実・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折回折計算，港湾技研資料 No. 230，1975.

Study on Estimation of Water Oscillation in Fishing Ports

By

Masaaki YAMAMOTO

Summary

This report describes about estimation methods of water oscillation in a fishing port, i.e. water moving up and down at a interval between several seconds and a few minutes.

As stated in chapter 1, fishing ports are constructed under various conditions. However, it is all important to keep the water of the basin calm, and actually, major part of the construction costs are spent for the purpose of ensuring this. Therefore, there is a need for methods to estimate the effect of breakwater, quay wall, jetty, etc..

In this report, three methods to estimate the wave oscillation in a fishing port is explained, and improvements are proposed on the following:

1) a method using wave's fundamental deformation
2) basin model test
3) numerical simulation
4) calculation of irregular wave height

1. Estimation based on wave's fundamental deformation

In this chapter, the method of estimation by connecting refraction, diffraction, shallowing and overtopping, step by step is explained.

Moreover, the following improvements were made.

① Wave height changes were obtained continuously from deep water to shoreline as follows. The wave height of increasing part with shallowing was shown approximately by equations (2–2) and (2–2″).

The wave height at the highest part was shown by equation (2–12).

The wave height of decreasing part by breaking was shown by equation (2–13).

These are shown in Fig. 2–20.

② The model basin test was executed and calculation was made about diffraction. And then, distribution of wave height ratio in case of double wave diffraction was obtained. As the results, the differences between model tests and theoretical calculations were found as shown in Figs. 2–30, 31, 32.

③ According to the results of experiments in the wave channel with several bottom slopes, an experimental equation to estimate transmitted wave height due to overtopping on vertical breakwater located in a surf-zone was proposed.

That is;

$$\frac{Ht}{H}=0.70\exp\left(\frac{R}{H}+1.11\frac{H}{H_0}+4.85\frac{h}{L_0}-0.67\frac{h}{H_0}\right)$$

In this case, Ht is the transmitted wave height, H is the coming wave height in front of breakwater, R is the height of a breakwater (above mean sea level), H_0 is the wave height in a deep water, L_0 is the wave length in a deep water, and h is the depth where the breakwater is located. It is shown in Fig. 2–41.

④ In small ports, long term period waves sometimes present more problems than short term period waves. The results of observation, in a certain port showed that long term period waves were caused in response to surf beat caused by short term period waves, and the height was some 1/10 of short ones.

2. Basin model test

In this chapter, method for planning and practicing general basin model test to seek wave height in a fishing port is shown. There are problems of simulation of a model to a prototype, facilities for model test, measurement, method of making a model, selection of testing wave conditions, points to be considered in executing, and a practical example.

The hydraulic model test requires much labor, expense and long term, but it is the most precise among three methods shown in this paper. It has the advantage of being able to observe generally the condition of waves. If the basin test is compared with numerical simulation, the former is economical in case of large test area or short period wind waves.

Moreover, at present, numerical simulations are not applicable to problems of wave breaking.

3. Numerical simulations

In chapter 4, the simulation method of wave transmission newly developed by the author is presented. That is a numerical method to solve the equations of motion and continuity altered into finite differences by use of high speed calculator. Newly, short period wave could be simulated by changing the long wave simulation, regarding wave traveling velocity, refflective rates, wave conditions (wave direction, period and height). And then the generalized computing program was accomplished.

This method fits in case that réfraction and diffraction occurs at the same time such as in the waters behind an island, and in case that reflection waves with different phases are mixed in a port basin. These problems can not be solved by using waves fundamental deformation.

4. Calculation of irregular wave height

Using the value estimated in one of the above three methods, a method to calculate an irregular wave height in a fishing port is proposed. Namely, the irregular wave height is estimated by summing element energy from each directions, and the element wave energy is assumed by regular wave through refraction, diffraction and reflection as follows;

$$H_{eff}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n} D_i(K_{ri}\cdot K_{di})^2+\sum_{i=1}^{n} D_i(K_{ri}\cdot K_{di}\cdot R_i)^2}\times H_0\times K_s$$

where

D : directional destribution ratio of wave energy
K_{ri} : refraction coefficient of each direction (i)
K_{di} : diffraction coefficient of each direction (i)
R_i : reflection coefficient of each direction (i)
K_s : shoaling coefficient

In deciding upon which of the three methods should be used natural conditions (see bottom, wave's height, period and direction), pattern of use of fishing port, scale of facilities required accuracy of estimation, etc., will have to be taken into account.

水工研報告 5
1985 pp. 149～177

防波堤下の鋼製桁沈床の挙動解析法に関する研究

大槇　正紀*　坪田　幸雄*

目　　次

1. 緒　　論……149
2. 基本式の誘導……150
  2.1 沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない場合の基本式……150
  2.2 沈床桁の上，下面のせん断力を考慮する場合の基本式……151
3. グリーン関数を用いた解析解……152
4. 有限要素法による解析……153
  4.1 汎関数の誘導……153
  4.2 理論式の離散化……154
5. 地盤反力諸係数の決定法……156
  5.1 地盤反力係数 a，m の決定……156
  5.2 せん断力に関する反力係数 μ の決定……156
  5.3 軸方向力の反力係数 ν と初期軸方向力 N_0 の決定……157
6. 解析結果と考察……158
  6.1 解析条件……158
  6.2 グリーン関数を用いた解析結果……160
  6.3 有限要素法による解析結果……161
7. 結　　論……171
参考文献……174
付　　録……174
Summary……177

1. 緒　　論

軟弱な海底地盤上に，防波堤などの長大な構造物を築造する場合，その構造物の機能を十分に発揮させるために，構造物自身の安定性及び耐沈下性に対する十分な検討が必要である。このため，多くの場合，何らかの海底地盤の改良が行なわれる。この中で，防波堤下の捨石マウンド中にH型鋼などの鋼製桁を等間隔に法線に直角方向に並べ，地盤を補強する，いわゆる沈床工法もその1つである。この工法は，沈床により上載荷重を分散させて基礎地盤に伝達させるとともに，円弧すべりによる安定解析において，沈床が十分のせん断抵抗を発揮するとして，沈床部分をすべり円弧が切らないことにより，地盤のせん断抵抗の増大を図るものである。しかし，この工法のみでは，軟弱地盤厚が厚くなった場合，沈下を十分にくい止めることはむずかしい。このような場合，他の地盤改良工法との併用により，構造物の安定性，耐沈下性を満足する経済的断面を得ることができる。

従来，沈床工法は軟弱地盤層厚が厚く，地盤改良を行うと膨大な費用を必要とする場合に，軟弱地盤上に捨石マウンドのみを施工し，この安定性を増すために，この中にH型鋼を設置する形で行われてきた。しかし，近年砂強制置換との併用による施工例もみられるようになった1)。鋼製沈床を用いた防波堤の施工例はあまり多くないが，著者らの知る範囲では，宮城県石巻工業港，同漁港，北海道苫小牧東港，香川県庵治工業港及び同漁港の防波堤で施工されている。この工法は施工例が少なく，沈床の挙動に不明な点が多いため，多くの施工例で沈床の挙動観測が行なわれており，その解析例も発表されている2),3)。

文献2)は，石巻工業港で計測された結果を地盤反力法により解析したものである。この例では，地盤反力は沈床桁の鉛直変位に比例するとする線形地盤反力を仮定して解析的に沈床桁の挙動を算定し，実測値と比較したものである。地盤反力係数は実測値から逆算して求め，これをもとにして新しい施工断面の設計に役立てている。文献3)は苫小牧東港防波堤の沈床の実測結果を，地盤を完全弾塑性体とみなして，有限要素法により解析したものである。実測は沈床桁の曲げモーメントと地盤反力について行っており，また，解析のための土質定数を得るために，多くの土質調査及び室内試験を行っている。結論として，沈床桁の沈下に対してほぼよい一致をみているが，曲げモーメントの分布形状で差異が出ているとしている。これらの解析例からも伺がえるように，現在，

---

* 水産土木工学部

防波堤下の鋼製桁沈床の挙動を予測するための十分な解析手法は確立されておらず，種々の試みがなされている段階と言える。

本文はこのような防波堤下の鋼製桁沈床の挙動解析を確立するための解析手法について述べたものである。解析手法としては文献[2)]と同様に地盤反力法を基本としているが，より一般性をもたせるため，非線形地盤反力，不均質地盤，任意分布荷重が扱えるようにより適用範囲の広い解析手法の確立を目指している。また，沈床の軸方向力も考慮できるように基本式を導いた。

解析手法としては，グリーン関数を用いた解析的方法と，有限要素法による数値的方法を示した。求めた解析手法を用いて，いくつかの想定した地盤状態，荷重条件に対し解析を行い，解析手法の妥当性を検討した。

2.　基本式の誘導

2.1　沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない場合の基本式

表1　沈床桁の特性を表わす記号

Symbols denoting the characteristics of steel beam

記号	説　　明		説　　明
A	沈床桁の断面積	I	沈床桁の断面2次モーメント
B	沈床桁の幅		
E	沈床桁のヤング率	l	沈床桁の長さ
h	沈床桁の高さ	P	沈床桁の設置間隔

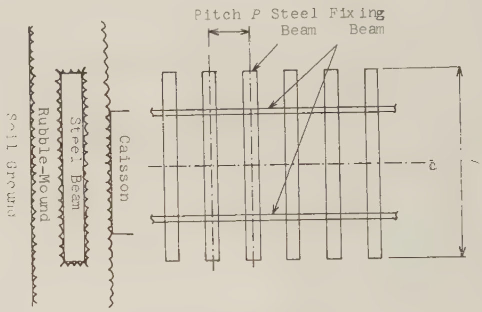

Pitch P
Steel Beam
Fixing Beam
Soil Ground
Rubble-Mound
Steel Beam
Caisson
l

図1　沈床の設置状況

State of installed steel beam

図1に示すように，沈床桁は等間隔にピッチPで防波堤の横断方向に並べられ，これらが防波堤の法線に平行な2本の鋼材で固定されているものとする。沈床桁の諸特性を表わす記号を表1に示す。なお，沈床桁は中央高さ$h/2$に関して，上下対称の断面形状をしており，かつ，この形状は沈床桁の長さ方向には一定とする。

はじめに，図2(a)に示すように，沈床桁の上下表面にせん断力が生じないとした場合の沈床桁の挙動を表わす基本式を求める。いま，水平方向に座標xを，鉛直方向に座標yをとる。沈床桁の微小長さdxに作用する力として，①曲げモーメント，M, $M+dM$，②せん断力：Q, $Q+dQ$，③上載荷重：$L(x)dx$，④地盤反力：$R(x)dx$を考える。このとき，力のつり合い式は次のようになる。

(i)　曲げモーメントのつり合い

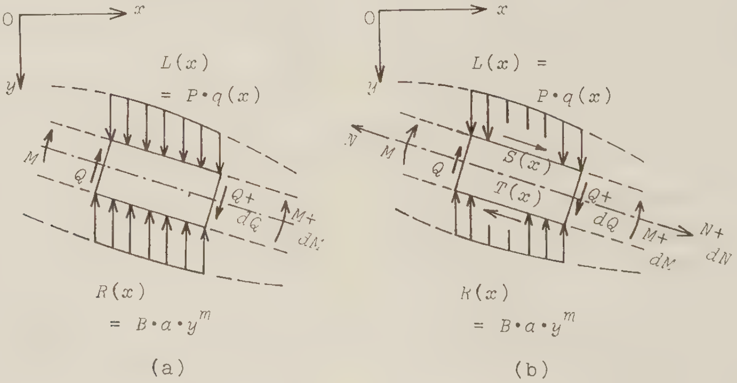

O
x
y
$L(x)$
$= P\cdot q(x)$
M
Q
$Q+dQ$
$M+dM$
$R(x)$
$= B\cdot a\cdot y^m$
(a)
O
x
y
$L(x) =$
$P\cdot q(x)$
N
M
Q
$S(x)$
$T(x)$
$Q+dQ$
$M+dM$
$N+dN$
$R(x)$
$= B\cdot a\cdot y^m$
(b)

図2　沈床桁に作用する力，(a)沈床桁表面にせん断力が作用しない場合，(b)沈床桁表面にせん断力が作用する場合

Forces subjected to steel beam, (a) shearing force on the surface of beam is not taken into account, (b) shearing force on the surface of beam is taken into account

$$Q-\frac{dM}{dx}=0 \quad\cdots\cdots(1)$$

(ii) 軸直角方向力のつり合い

$$\frac{dQ}{dx}=R(x)-L(x) \quad\cdots\cdots(2)$$

ここで，1本の沈床桁がピッチ幅Pにかかる上載荷重を受けもつとする。すなわち，$L(x)$ を次のように表わす。

$$L(x)=P\cdot q(x) \quad\cdots\cdots(3)$$

ここに，$q(x)$ は上載荷重強度である。また，地盤反力 $R(x)$ は沈床桁の沈下量 y のベキ乗に比例するとして，次のように表わす。

$$R(x)=B\cdot a\cdot y^m \quad\cdots\cdots(4)$$

ここに，a，mは地盤反力を表わす係数である。直線梁の弾性曲線の式として，次の関係を用いる。

$$M=-EIy'' \quad\cdots\cdots(5)$$

ここに，$y''\equiv d^2y/dx^2$ である。式(1)～(5)より，次の弾性支承上の梁としての基本式が得られる。

$$L_1(y)=(a_0y'')''+a_4y=P\cdot q(x) \quad\cdots\cdots(6)$$

ここに，

$$a_0=EI,\ \ a_4=B\cdot a\cdot y^{m-1} \quad\cdots\cdots(7)$$

$$M=-a_0y'',\ \ Q=-(a_0y'')' \quad\cdots\cdots(8)$$

ここで，沈床桁の左右端での境界条件を次のように与える。

(i) 沈床桁の左端（$x=a$）

$$M_a=0,\ \ Q_a=A_a\cdot\mu_a\cdot y_a \quad\cdots\cdots(9)$$

(ii) 沈床桁の右端（$x=b$）

$$M_b=0,\ \ Q_b=-A_b\cdot\mu_b\cdot y_b \quad\cdots\cdots(10)$$

ここに，M，Qはそれぞれ曲げモーメント及びせん断力，A，μ，yはそれぞれ沈床桁の断面積，沈床桁の端でのせん断力に関する反力係数及び鉛直変位である。また，サフィックスのa，bはそれぞれが沈床桁の左端及び右端の値であることを示している。式(8)を用いると，境界条件式(9)，(10)は鉛直変位を用いて次のように書き直せる 。

(i) 沈床桁の左端（$x=a$）

$$y''_a=0,\ \ (a_0y''_a)'+A_a\cdot\mu_a\cdot y_a=0 \quad\cdots\cdots(11)$$

(ii) 沈床桁の右端

$$y''_b=0,\ \ (a_0y''_b)'-A_b\cdot\mu_b\cdot y_b=0 \quad\cdots\cdots(12)$$

2.2 沈床桁の上，下面のせん断力を考慮する場合の基本式

図2(b)に示すように，図2(a)で考えた断面力，作用力の他に，①沈床桁の上面に作用する上載荷重の沈床桁に平行な成分 $S(x)$，②沈床桁の下面に作用する地盤反力の沈床桁に平行な成分 $T(x)$ を考える。このとき，$S(x)$，$T(x)$ は式(3)(4)を用いて次のように表わす。

$$\left.\begin{aligned}S(x)&=L(x)\sin\theta\simeq P\cdot q(x)\cdot y'\\ T(x)&=R(x)\sin\theta\simeq B\cdot a\cdot y^m\cdot y'\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(13)$$

ここに，θは沈床桁のたわみ角であり，次式が成り立つ。

$$y'=\theta \quad\cdots\cdots(14)$$

図2(b)に示したように，沈床桁の微小長さ dx に作用する断面力として，曲げモーメント M，$M+dM$，せん断力Q，$Q+dQ$ の他に，軸方向力 N，$N+dN$（引張りを正）を考えると，力のつり合いは次のように書ける。

(i) 曲げモーメントのつり合い

$$\frac{dM}{dx}-Q=\frac{h}{2}\{S(x)+T(x)\}y' \quad\cdots\cdots(15)$$

(ii) 軸直角方向力のつり合い

$$\frac{dQ}{dx}=R(x)-L(x) \quad\cdots\cdots(16)$$

(iii) 軸方向力のつり合い

$$\frac{dN}{dx}=T(x)-S(x) \quad\cdots\cdots(17)$$

ここで，直線梁の弾性曲線式(5)を用いると，式(15)(16)より，次の基本式を得る。

$$M_1(y)=(a_0y'')''+(a_2y')'+a_4y=P\cdot q(x) \quad\cdots(18)$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned}&a_0=EI,\ \ a_2=\frac{h}{2}\{P\cdot q(x)+B\cdot a\cdot y^m\}\\ &a_4=B\cdot a\cdot y^{m-1}\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(19)$$

$$M=-a_0y'',\ \ Q=-\{(a_0y'')'+a_2y'\} \quad\cdots\cdots(20)$$

他方，軸方向力Nは沈床桁の軸方向変位uを用いて次のように表わされる。

$$N=AEu' \quad\cdots\cdots(21)$$

この式を用いると，式(13)，(17)から，もう1つの基本式として次式を得る。

$$M_2(u)=(b_0u')'=b_1y'\ \ (\equiv f(x)) \quad\cdots\cdots(22)$$

ここに，

$$b_0=AE,\ \ b_1=B\cdot a\cdot y^m-P\cdot q(x) \quad\cdots\cdots(23)$$

$$N=b_0\cdot u' \quad\cdots\cdots(24)$$

つぎに，境界条件を次のように与える。

(i) 沈床桁の左端（$x=a$）

$$\left.\begin{aligned}&M_a=0,\ \ Q_a=A_a\cdot\mu_a\cdot y_a\\ &N_a=N_{0a}+A_a\cdot\nu_a\cdot u_a\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(25)$$

(ii) 沈床桁の右端（$x=b$）

$$\left.\begin{aligned}&M_b=0,\ \ Q_b=-A_b\cdot\mu_b\cdot y_b\\ &N_b=N_{0b}-A_b\cdot\nu_b\cdot u_b\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(26)$$

ここに，μは式(9)，(10)の場合と同じせん断力に関する反力係数である。また，N_0 は静止土圧による沈床

桁の両端での軸方向力，ν は軸方向力に関する反力係数である。サフィックス a，b はそれぞれの値が沈床桁の左端及び右端の値であることを示している。

式(20)，(24)を用いると，境界条件式(25)，(26)は次のように表わされる。

(i)　沈床桁の左端（$x=a$）

$$\left.\begin{aligned} &y_a''=0,\ (a_0y_a'')'+a_2y_a'+A_a\cdot\mu_a\cdot y_a=0 \\ &b_0u_a'-A_a\cdot\nu_a\cdot u_a=N_{0a}\end{aligned}\right\}\quad(27)$$

(ii)　沈床桁の右端（$x=b$）

$$\left.\begin{aligned} &y_b''=0,\ (a_0y_b'')'+a_2y_b'-A_b\cdot\mu_b\cdot y_b=0 \\ &b_0u_b'+A_b\cdot\nu_b\cdot u_b=N_{0b}\end{aligned}\right\}\cdots(28)$$

3.　グリーン関数を用いた解析解

与えられた基本式が線形微分方程式となるとき，グリーン関数を用いて解を求めることができる[4)]。ここでは，**2.1** に示した沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない場合で，地盤反力が沈床桁の鉛直変位量に対して線形的に比例する場合，すなわち，式(4)において，$m=1$ の場合について考える。このとき，沈床桁の断面形状はその長さ方向に一定しているから，基本式及び境界条件は次のようになる。

①　基本式

$$L(y)=a_0y^{(4)}+a_4y=P\cdot q(x)\cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

ここに，

$$a_0=EI\ （一定）,\quad a_4=B\cdot a\ （一定）\ \cdots\cdots\cdots\cdots(30)$$

②　境界条件

(i)　沈床桁の左端（$x=a=0$ とする）

$$y_a''=0,\quad a_0y_a^{(3)}+A_a\cdot\mu_a\cdot y_a=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots(31)$$

(ii)　沈床桁の右端（$x=b=l$ とする）

$$y_b''=0,\quad a_0y_b^{(3)}-A_b\cdot\mu_b\cdot y_b=0\cdots\cdots\cdots\cdots(32)$$

このとき，式(29)の斉次形は次のようになる。

$$L[y]=a_0y^{(4)}+a_4y=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots(33)$$

ここで，次のように，基本式及び境界条件を無次元化する。

①　基本式

$$L[Y]=Y^{(4)}+4\cdot(\beta l)^4Y=F(X)\cdots\cdots\cdots\cdots(34)$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned} &\beta=\sqrt[4]{\frac{a_4}{4a_0}},\quad F(X)=\frac{l^3}{a_0}P\cdot q(x) \\ &X=\frac{x}{l},\qquad Y=\frac{y}{l}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(35)$$

②　境界条件

$$\left.\begin{aligned} &\text{(i)}\quad X=0:Y_a^{(2)}=0,\quad Y_a^{(3)}+\Lambda_aY_a=0 \\ &\text{(ii)}\quad X=1:Y_b^{(2)}=0,\quad Y_b^{(3)}-\Lambda_bY_b=0\end{aligned}\right|\cdots(36)$$

ここに，

$$\Lambda_a=\frac{A_a\cdot\mu_a\cdot l^3}{a_0},\quad \Lambda_b=\frac{A_b\cdot\mu_b\cdot l^3}{a_0}$$

このとき，式(34)の斉次形，

$$L[Y]=Y^{(4)}+4(\beta l)^4Y=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots(37)$$

の特解として，次の4つを考える。

$$\left.\begin{aligned} &U_1=\sin\beta lX\sinh\beta lX,\quad U_2=\sin\beta lX\cosh\beta lX \\ &U_3=\cos\beta lX\sinh\beta lX,\quad U_4=\cos\beta lX\cosh\beta lX\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(38)$$

式(38)の各特解は単独では式(36)の境界条件を満足しないので，これらのいくつかの線形和が境界条件を満足するように基本解を求める。このとき，沈床桁の左端（$X=0$）での境界条件を満足する基本解を Y_1，Y_2，沈床桁の右端（$X=1$）での境界条件を満足する基本解を Y_3，Y_4 とすると，これらは次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned} &Y_1=U_2+U_3,\quad Y_2=U_2-\xi_aU_4 \\ &Y_3=\frac{\alpha_1}{\alpha_2}U_1+U_2+\frac{\alpha_3}{\alpha_2}U_3 \\ &Y_4=\frac{\beta_1}{\beta_2}U_1+U_2+\frac{\beta_3}{\beta_2}U_4\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(39)$$

ここに，

$$\begin{aligned} &\alpha_1=\xi_b(\sin2\beta l-\sinh2\beta l)+\cos2\beta l-\cosh2\beta l \\ &\alpha_2=\xi_b(1+\cosh2\beta l)+\sin2\beta l \\ &\alpha_3=\beta_3=\xi_b(1+\cos2\beta l)-\sin2\beta l \\ &\beta_1=\xi_b(1-\cosh2\beta l)-\sinh2\beta l \\ &\beta_2=\xi_b(\sin2\beta l+\sinh2\beta l)+\cos2\beta l+\cosh2\beta l \\ &\xi_a=\frac{2(\beta l)^3}{\Lambda_a},\quad \xi_b=\frac{2(\beta l)^3}{\Lambda_b}\end{aligned}\qquad\cdots\cdots\cdots\cdots(40)$$

いま，Y_i，Y_i'，Y_i''，$Y_i^{(3)}$（$i=1$～4）より成る次の行列式を導入する。

$$\left.\begin{aligned} &\Delta(X)=\begin{vmatrix} Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ Y_1' & Y_2' & Y_3' & Y_4' \\ Y_1'' & Y_2'' & Y_3'' & Y_4'' \\ Y_1^{(3)} & Y_2^{(3)} & Y_3^{(3)} & Y_4^{(3)}\end{vmatrix}, \\ &\Delta_i(X)=\begin{vmatrix} Y_j & Y_k & Y_l \\ Y_j' & Y_k' & Y_l' \\ Y_j'' & Y_k'' & Y_l''\end{vmatrix}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(41)$$

ここに，(i，j，k，l)≡(1，2，3，4)，(2，3，4，1)，(3，4，1，2)，(4，1，2，3）のような（1，2，3，4）の順環置換である。このとき，$\Delta(X)$ は X に無関係に一定であるから，次のように表わされる。

$$\Delta(X)=\Delta(0)=\frac{8(\beta l)^6}{\alpha_2\beta_2}\{\xi_a(\alpha_1\beta_2-\alpha_2\beta_1+\alpha_3\beta_1)+\alpha_1\beta_3\}\ \cdots\cdots\cdots\cdots(42)$$

また，$\Delta_i(X)$ の微係数は付録1②に示す。

このとき，斉次微分方程式(37)に対するグリーン関数は次のように表わされる（付録１③参照)。

(i)　$X \leqq X_k$ のとき

$$G(X, X_k) \equiv G_A(X, X_k) = \frac{1}{\varDelta(0)}\{\varDelta_1(X_k)Y_1(X) - \varDelta_2(X_k)Y_2(X)\} \quad \cdots\cdots(43)$$

(ii)　$X > X_k$ のとき

$$G(X, X_k) \equiv G_B(X, X_k) = \frac{1}{\varDelta(0)}\{-\varDelta_3(X_k)Y_3(X) + \varDelta_4(X_k)Y_4(X)\} \quad \cdots\cdots(44)$$

このとき，無次元化され鉛直変位の解析解は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} Y(X) &= \int_0^X G_B(X, X_k)F(X_k)dX_k + \int_X^1 G_A(X, X_k)F(X_k)dX_k \\ &= \frac{1}{\varDelta(0)}\{Y_1(X)I_1(X) - Y_2(X)I_2(X) + Y_3(X)I_3(X) - Y_4(X)I_4(X)\} \quad \cdots\cdots(45) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_X^1 \varDelta_1(X)F(X)dX, \\ I_2 &= \int_X^1 \varDelta_2(X)F(X)dX \\ I_3 &= -\int_0^X \varDelta_3(X)F(X)dX \\ I_4 &= -\int_0^X \varDelta_4(X)F(X)dX \end{aligned} \quad \cdots\cdots(46)$$

式(45)により，無次元化された鉛直変位の解析解が求まると，実際の変位，たわみ角，断面力は次のように計算される。

$$y = lY, \quad \theta = Y', \quad M = -\frac{a_0}{l}Y'', \quad Q = -\frac{a_0}{l^2}Y^{(3)} \quad \cdots\cdots(47)$$

ただし，Y'，Y''，$Y^{(3)}$ は付録１④に示している。

4.　有限要素法による解析

4.1　汎関数の誘導

ここでは，鉛直変位 y と軸方向変位 u を変分の対象として，**2.** で求めた基本式及び境界条件に対する汎関数を求める。

4.1.1　沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない場合

基本式(６)より，次の変分を考え，いくらかの部分積分を行う。ただし，係数 a_0，a_4 は変分に無関係な量と考える。

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= \int_a^b \{L_1[y] - P\cdot q(x)\}\delta y dx \\ &= |(a_0 y'')'\delta y - a_0 y''\delta y'|_a^b \\ &\quad + \int_a^b \{a_0 y''\delta y'' + a_4 y\delta y - P\cdot q(x)\delta y\} dx \end{aligned}$$

これより，式(11)，(12)の境界条件を考慮すると，次の汎関数を得る。

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2}(A_a\cdot\mu_a\cdot y_a{}^2 + A_b\cdot\mu_b\cdot y_b{}^2) \\ &\quad + \frac{1}{2}\int_a^b \{a_0(y'')^2 + a_4 y^2\} dx - \int_a^b P\cdot q(x) y dx \end{aligned} \quad \cdots\cdots(48)$$

すなわち，基本式(６)，境界条件式(11)，(12)が成立すると $\delta\Pi = 0$ となる。

4.1.2　沈床桁の上，下面のせん断力を考慮する場合

基本式(18)，(22)より，次の変分を考え，いくらかの部分積分を行う。ただし，係数 a_0，a_2，a_4，b_0，b_1 は変分に無関係な量と考える。

$$\begin{aligned} \delta\Omega_1 &= \int_a^b \{M_1[y] - P\cdot q(x)\}\delta y dx \\ &= \left|\{(a_0 y'')' + a_2 y'\}\delta y - a_0 y''\delta y'\right|_a^b \\ &\quad + \int_a^b \{a_0 y''\delta y'' - a_2 y'\delta y' + a_4 y\delta y - P\cdot q(x)\cdot\delta y\} dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta\Omega_2 &= \int_a^b \{M_2[u] - f(x)\}\delta u dx = b_0 u'\delta u\Big|_a^b \\ &\quad - \int_a^b \{b_0 u'\delta u' + f(x)\delta u\} dx \end{aligned}$$

これより，式(27)，(28)の境界条件を考慮すると，次の汎関数を得る。

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \frac{1}{2}(A_a\cdot\mu_a\cdot y_a{}^2 + A_b\cdot\mu_b\cdot y_b{}^2) \\ &\quad + \frac{1}{2}\int_a^b \{a_0(y'')^2 - a_2(y')^2 + a_4 y^2\} dx \\ &\quad - \int_a^b P\cdot q(x) y dx \quad \cdots\cdots(49) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega_2 &= -N_{0a}u_a + N_{0b}u_b \\ &\quad - \frac{1}{2}(A_a\cdot\nu_a\cdot u_a{}^2 + A_b\cdot\nu_b\cdot u_b{}^2) \\ &\quad - \frac{1}{2}\int_a^b b_0(u')^2 dx - \int_a^b b_1 y' u dx \quad \cdots\cdots(50) \end{aligned}$$

すなわち，基本式(18)，(22)と境界条件式(27)，(28)

が成立するとき，$\delta\Omega_1=0$，$\delta\Omega_2=0$ となる。

4.2　基本式の離散化

ここでは，前節で求めた汎関数を用いて，有限要素法による離散化を行う。離散化に当っては，沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない場合は，これを考慮する場合の特別の場合（式(18)において，$a_2=0$ とおき，$M_2[u]\equiv0$ とすれば得られる）となっているので，沈床桁の上，下面のせん断力を考慮する場合を扱う。

図3(a)に示すように，沈床桁を N 個の線要素に分割する。各要素の離散化モデルとして，① 4節点3次A要素，② 2節点3次B要素，③ 2節点5次C要素，の3種類[5]を用いて計算を行う。

4.2.1　4節点3次A要素による離散化

図3(b)に示すように，各要素を3個に等間隔に分割し要素の両端及び要素内の2個の分割点の合計4節点の変位（y_i，u_i）（$i=1\sim4$）を未知数とする。これらの各節点の変位を用いて，要素内の任意点の変位を内そう近似するとき，要素内の任意点の変位 y，u とその微係数は次のように表わされる。

$$\left.\begin{array}{l} y=\boldsymbol{y}^T p\boldsymbol{f}^{(3)},\ (y)'=\boldsymbol{y}^T p_x\boldsymbol{f}^{(2)},\ (y)''=\boldsymbol{y}^T p_{xx}\boldsymbol{f}^{(1)} \\ u=\boldsymbol{u}^T p\boldsymbol{f}^{(3)},\ u'=\boldsymbol{u}^T p_x\boldsymbol{f}^{(2)} \end{array}\right\} \quad\cdots\cdots(51)$$

ここに，行列 p，p_x，p_{xx} は付録2 ①に示している。また，

$$\left.\begin{array}{l} \boldsymbol{f}^{(3)}=(\zeta_1^3,\ \zeta_1^2\zeta_2,\ \zeta_1\zeta_2^2,\ \zeta_2^3)^T \\ \boldsymbol{f}^{(2)}=(\zeta_1^2,\ \zeta_1\zeta_2,\ \zeta_2^2)^T \\ \boldsymbol{f}^{(1)}=(\zeta_1,\ \zeta_2)^T \\ \boldsymbol{y}=(y_1,\ y_2,\ y_3,\ y_4)^T \\ \boldsymbol{u}=(u_1,\ u_2,\ u_3,\ u_4)^T \end{array}\right\} \quad\cdots\cdots(52)$$

式中の ζ_1，ζ_2 は図4に示す線座標である。また，上添字 T は転置を意味する。式(51)を式(49)，(50)に代入すると，1つの要素 e についての汎関数 Ω_1^e，Ω_2^e は次のように表わされる。

$$\left.\begin{array}{l} \Omega_1^e=\dfrac{1}{2}([A_a\cdot\mu_a\cdot\boldsymbol{y}_a^T\cdot I_a\cdot\boldsymbol{y}_a] \\ \qquad+[A_b\cdot\mu_b\cdot\boldsymbol{y}_b^T\cdot I_b\cdot\boldsymbol{y}_b]) \\ \qquad+\dfrac{l^e}{2}\cdot\boldsymbol{y}^T\cdot J\cdot\boldsymbol{y}-P\cdot q^e\cdot l^e\cdot\boldsymbol{p}^T\cdot\boldsymbol{y} \\ \Omega_2^e=-[N_{0a}\cdot I_a\cdot\boldsymbol{u}_a]+[N_{0b}\cdot I_b\cdot\boldsymbol{u}_b] \\ \qquad-\dfrac{1}{2}([A_a\cdot\nu_a\cdot\boldsymbol{u}_a^T\cdot I_a\cdot\boldsymbol{u}_a] \\ \qquad+[A_b\cdot\nu_b\cdot\boldsymbol{u}_b^T\cdot I_b\cdot\boldsymbol{u}_b]) \\ \qquad-\dfrac{l^e}{2}b_0\boldsymbol{u}^T p^x\boldsymbol{u}-l^e\cdot b_1\cdot\boldsymbol{y}^T\cdot\phi\cdot\boldsymbol{u} \end{array}\right\} \quad\cdots\cdots(53)$$

ただし，

$$J=a_0p^{xx}-a_2p^x+a_4\bar{p} \quad\cdots\cdots(54)$$

であり，4×4次元行列 p^{xx}，p^x，$\bar{p}$，ϕ，I_a，I_b 及び4次元ベクトル $\boldsymbol{p}$ は付録2 ①に示している。また，$\boldsymbol{y}_a$，$\boldsymbol{u}_a$ はそれぞれ沈床桁の左端に対する $\boldsymbol{y}$，$\boldsymbol{u}$ であり，$\boldsymbol{y}_b$，$\boldsymbol{u}_b$ は沈床桁の右端の要素に対するものである。したがって〔　〕内の項は，沈床桁の左右端の要素の場合

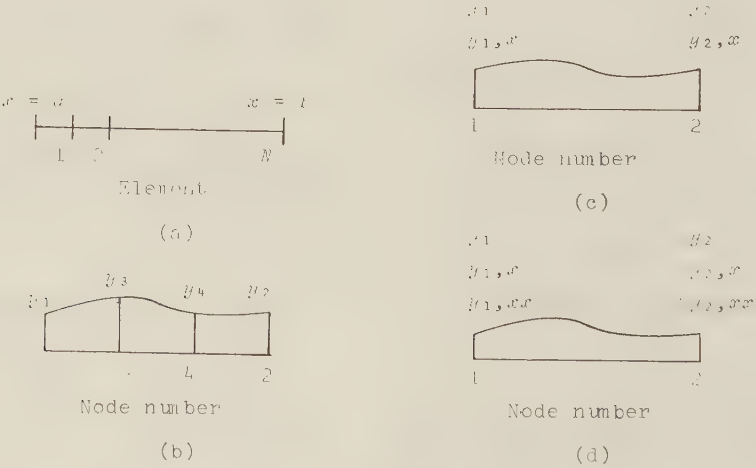


図 3　要素分割と内そうモデル，（a）沈床桁の要素分割，（b）4節点3次A要素，（c）2節点3次B要素，（d）2節点5次C要素

Element division and interpolation model, (a) element division of steel beam, (b) 4 nodes-3rd ordered A element, (c) 2 nodes-3rd ordered B element, (d) 2 nodes-5th ordered C element

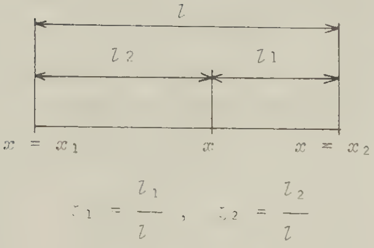


図 4　線　座　標

Line coordinate

のみ考慮するものとする。l^e は要素の長さ，q^e は各要素での $q(x)$ の平均値である。

ここで，式(53)の変分をとるが，式(53)の第 2 式においては，$\boldsymbol{y}$ は既知として $\boldsymbol{u}$ のみについて変分操作を行う（$\boldsymbol{y}$ は，式(53)の第 1 式より独自に求まる）。すなわち，

$$\begin{aligned}\delta\Omega_1 &= [A_a\cdot\mu_a\cdot\boldsymbol{y}_a{}^T\cdot I_a\cdot\delta\boldsymbol{y}_a]+[A_b\cdot\mu_b\cdot\boldsymbol{y}_b{}^T\cdot I_b\cdot\delta\boldsymbol{y}_b]\\ &\quad +l^e\cdot\boldsymbol{y}^T\cdot J\cdot\delta\boldsymbol{y}-P\cdot q^e\cdot l^e\cdot\boldsymbol{p}^T\cdot\delta\boldsymbol{y}\\ \delta\Omega_2 &= -[N_{0a}\cdot I_a\cdot\delta\boldsymbol{u}_a]+[N_{0b}\cdot I_b\cdot\delta\boldsymbol{u}_b]\\ &\quad -[A_a\cdot\nu_a\cdot\boldsymbol{u}_a{}^T\cdot I_a\cdot\delta\boldsymbol{u}_a]-[A_b\cdot\nu_b\cdot\boldsymbol{u}_b{}^T\cdot I_b\cdot\delta\boldsymbol{u}_b]\\ &\quad -l^e\cdot b_0\cdot\boldsymbol{u}^T\cdot p^x\cdot\delta\boldsymbol{u}-l^e\cdot b_1\cdot\boldsymbol{y}^T\cdot\phi\cdot\delta\boldsymbol{u}\end{aligned}$$

いま，$\delta\Omega_1=\delta\Omega_2=0$ の場合を考えると，$\delta\boldsymbol{y}$, $\delta\boldsymbol{u}$ は任意にとれるから，これらの係数行列がゼロとなる必要がある。すなわち，要素 e の変位に関する次の多元連立方程式が得られる。

$$\left.\begin{aligned}&[A_a\cdot\mu_a\cdot I_a\cdot\boldsymbol{y}_a]+[A_b\cdot\mu_b\cdot I_b\cdot\boldsymbol{y}_b]+l^e\cdot J\cdot\boldsymbol{y}\\ &\quad =P\cdot q^e\cdot l^e\cdot\boldsymbol{p}\\ &[A_a\cdot\nu_a\cdot I_a\cdot\boldsymbol{u}_a]+[A_b\cdot\nu_b\cdot I_b\cdot\boldsymbol{u}_b]+l^e\cdot b_0\cdot p^x\cdot\boldsymbol{u}\\ &\quad =[N_{0a}\cdot\boldsymbol{I}_a]+[N_{0b}\cdot\boldsymbol{I}_b]-l^e\cdot b_1\cdot\phi^T\cdot\boldsymbol{y}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(55)$$

これより，各要素の $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{u}$ についての多元連立方程式が得られたので，これを沈床桁全体の要素について合成することにより，全要素の（$\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{u}$）に関する多元連立方程式を得る。これを解くことにより，各要素での（$\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{u}$）が得られる。このとき要素内の任意点での変位，たわみ角，断面力は次で計算される。

$$\left.\begin{aligned}&y=\boldsymbol{y}^T\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(3)},\ u=\boldsymbol{u}^T\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(3)},\ \theta=\boldsymbol{y}^T\cdot p_x\cdot\boldsymbol{f}^{(2)}\\ &N=b_0\cdot\boldsymbol{u}^T\cdot p_x\cdot\boldsymbol{f}^{(2)},\ M=-a_0\cdot\boldsymbol{y}^T\cdot p_{xx}\boldsymbol{f}^{(1)},\\ &Q=-a_0\cdot\boldsymbol{y}^T\cdot p_{xxx}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(56)$$

4.2.2　2 節点 3 次 B 要素による離散化

図 3(c)に示すように，各要素の両端での変位（y_i, u_i）及びその 1 次微係数（$y_{i,x}$, $u_{i,x}$）（$i=1$, 2）を未知数とするものである。これらを用いると，要素内の任意点の変位は，3 次関数により次のように内そう近似される。

$$y=\boldsymbol{q}^T\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(3)},\ u=\boldsymbol{r}^T\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(3)}\quad\cdots\cdots(57)$$

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{q}=(y_1,\ y_{1,x},\ y_2,\ y_{2,x})^T\\ &\boldsymbol{r}=(u_1,\ u_{1,x},\ u_2,\ u_{2,x})^T\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(58)$$

また，4 × 4 次元行列 p は付録 2 ②に示している。式(57)で表わされる y, u を式(49)，(50)に代入し，$\delta\Omega_1{}^e=0$, $\delta\Omega_2{}^e=0$ となるようにすると，**4.2.1**の場合と同様にして次式を得る。

$$\left.\begin{aligned}&[A_a\cdot\mu_a\cdot I_a\cdot\boldsymbol{q}_a]+[A_b\cdot\mu_b\cdot I_b\cdot\boldsymbol{q}_b]+l^e\cdot J\cdot\boldsymbol{q}\\ &\quad =P\cdot q^e\cdot l^e\boldsymbol{p}\\ &[A_a\cdot\nu_a\cdot I_a\cdot\boldsymbol{r}_a]+[A_b\cdot\nu_b\cdot I_b\cdot\boldsymbol{r}_b]+l^e\cdot b_0\cdot p^x\cdot\boldsymbol{r}\\ &\quad =-[N_{0a}\cdot\boldsymbol{I}_a]+[N_{0b}\cdot\boldsymbol{I}_b]-l^e\cdot b_1\cdot\phi^T\cdot\boldsymbol{q}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(59)$$

ここに，サフィックス a，b のついた量はそれぞれ沈床桁の左右端の要素での値を示す。また，J は式(54)で表わされる。この式中の行列 p^{xx}, p^x, $\bar{p}$, ベクトル $\boldsymbol{p}$ $\boldsymbol{I}_a$, $\boldsymbol{I}_b$ 及び行列 I_a, I_b は付録 2 ②に示す。

各要素での（$\boldsymbol{q}$, $\boldsymbol{r}$）に関する多元連立方程式が得られたので，これを沈床桁全体の要素について合成すれば，全要素での（$\boldsymbol{q}$, $\boldsymbol{r}$）に関する多元連立方程式が得られる。したがって，これを解くことにより，全要素での（$\boldsymbol{q}$, $\boldsymbol{r}$）が得られる。このとき，各要素内の任意点での変位，たわみ角，断面力は次式により計算される。

$$\left.\begin{aligned}&y=\boldsymbol{q}^T\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(3)},\ u=\boldsymbol{r}^T\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(2)},\ \theta=\boldsymbol{q}^T\cdot p_x\cdot\boldsymbol{f}^{(2)}\\ &N=b_0\cdot\boldsymbol{r}^T\cdot p_x\cdot\boldsymbol{f}^{(3)},\ M=-a_0\cdot\boldsymbol{q}^T\cdot p_{xx}\cdot\boldsymbol{f}^{(1)}\\ &Q=-a_0\cdot\boldsymbol{q}^T\cdot p_{xxx}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(60)$$

式中の行列 p_x, p_{xx}, p_{xxx} は付録 2 ②に示している。

4.2.3　2 節点 5 次 C 要素による離散化

図 3(d)に示すように，各要素の両端での変位（y_i, u_i）とその 1 次及び 2 次微係数（$y_{i,x}$, $u_{i,x}$），（$y_{i,xx}$, $u_{i,xx}$）（$i=1$, 2）を未知数とするものである。これらを用いると，要素内の任意点の変位は 5 次関数により次のように内そう近似される。

$$y=\boldsymbol{q}\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(5)},\ u=\boldsymbol{r}\cdot p\cdot\boldsymbol{f}^{(5)}\quad\cdots\cdots(61)$$

ここに，p は 6 × 6 次元行列で付録 2 ③に示している。また，

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{q}=(y_1,\ y_{1,x},\ y_{1,xx},\ y_2,\ y_{2,x},\ y_{2,xx})^T\\ &\boldsymbol{r}=(u_1,\ u_{1,x},\ u_{1,xx},\ u_2,\ u_{2,x},\ u_{2,xx})^T\\ &\boldsymbol{f}^{(5)}=(\zeta_1{}^5,\ \zeta_1{}^4\zeta_2,\ \zeta_1{}^3\zeta_2{}^2,\ \zeta_1{}^2\zeta_2{}^3,\ \zeta_1\zeta_2{}^4,\ \zeta_2{}^5)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(62)$$

式(61)を式(49)，(50)に代入して，1 つの要素について $\delta\Omega_1{}^e=0$, $\delta\Omega_2{}^e=0$ の操作を行うと，式(59)と同じ形の（$\boldsymbol{q}$, $\boldsymbol{r}$）に関する次の多元連立方程式を得る。

$$\begin{aligned}&[A_a\cdot\mu_a\cdot I_a\cdot\boldsymbol{q}_a]+[A_b\cdot\mu_b\cdot I_b\cdot\boldsymbol{q}_b]+l^e\cdot J\cdot\boldsymbol{q}\\ &\quad =P\cdot q^e\cdot l^e\cdot\boldsymbol{p}\end{aligned}$$

$$[A_a\cdot\nu_a\cdot\boldsymbol{I}_a\cdot\boldsymbol{r}_a]+[A_b\cdot\nu_b\cdot\boldsymbol{I}_b\cdot\boldsymbol{r}_b]+l^e\cdot b_0\cdot p^x\cdot\boldsymbol{r}$$
$$=-[N_{0a}\cdot\boldsymbol{I}_a]+[N_{0b}\cdot\boldsymbol{I}_b]-l^e\cdot b_1\cdot\phi^T\cdot\boldsymbol{q} \quad\cdots\cdots(63)$$

ここに，サフィックスの a，b のついた量はそれぞれ沈床桁の左端及び右端に対するものであり，これらの要素でのみ考慮されるものである。J は式（54）で表わされ，式中の行列 p^{xx}，p^x，$\bar{p}$，ベクトル $\boldsymbol{p}$ 及び行列 I_a，I_b，ベクトル $\boldsymbol{I}_a$，$\boldsymbol{I}_b$ は付録２③に示している。

式(63)により，１つの要素についての（$\boldsymbol{q}$，$\boldsymbol{r}$）に関する多元連立方程式が得られたので，これを全要素について合成することにより，沈床桁の全要素の（$\boldsymbol{q}$，$\boldsymbol{r}$）に関する多元連立方程式が得られる。したがって，これを解くことにより，全要素での（$\boldsymbol{q}$，$\boldsymbol{r}$）が求まる。各要素での（$\boldsymbol{q}$，$\boldsymbol{r}$）が求まると，各要素内での任意点での変位，たわみ角，断面力は式(60)により求められる。ただし式中の p，p_x，p_{xx}，p_{xxx} は付録２③に示している。

5.　地盤反力諸係数の決定法

上で求めた基本式，及び境界条件式には，次の地盤反力に関する定数が含まれている。

a，m：沈床桁の下の地盤反力に関する係数
μ_a，μ_b：沈床桁の左右端でのせん断力に関する反力係数
ν_a，ν_b：沈床桁の左右端での軸方向力に関する反力係数
N_{0a}，N_{0b}：沈床桁の左右端における初期軸方向力

これらの諸定数を何らかの方法により，決定する必要がある。ここでは，杭の軸直角方向支持力の決定方法に従って，これらを標準貫入試験のN値から求めることにする。ここでは，N値を沈床桁の軸方向力Nと区別するため，N_{spt} で表わす。

5.1　地盤反力係数 a，m の決定

式(４)から，単位面積当りの地盤反力 $r(x)$ は次のように表わされる。

$$r(x)=a\cdot y^m \quad\cdots\cdots(64)$$

杭の軸直角方向支持力は，地盤反力が変位に比例する，いわゆる線形地盤に対しては，次式で与えられる$^{6)}$。

$$p=k_h y \quad\cdots\cdots(65)$$

ここに，p：地盤反力，$k_h=E_S/B$：横方向地盤反力係数，E_S：地盤の弾性係数，y：水平変位，である。他方，非線形地盤に対しては，次のように表わされる$^{7)}$。

$$S型地盤：p=k_S\cdot x\cdot y^{0.5} \quad\cdots\cdots(66)$$
$$C型地盤：p=k_C\cdot y^{0.5} \quad\cdots\cdots(67)$$

ここに，k_S，k_C はそれぞれS型地盤及びC型地盤における横抵抗定数である。地盤反力定数 k_h，k_S，k_C と標準貫入試験のN値との関係は，図５，６，７のように示されている$^{6),7)}$。ここでは，線形な地盤反力の場合として，式(65)を，非線形な地盤反力の場合として式(67)を考える。これらの場合の地盤反力係数は，図５，図７より次のように表わされる。

(i)　線形地盤の場合

$$k_h\fallingdotseq 0.2\cdot N_{spt} \quad\cdots\cdots(68)$$

(ii)　C型非線形地盤の場合

$$k_C\fallingdotseq 0.51\cdot N_{spt}^{0.61} \quad\cdots\cdots(69)$$

式（64）で表わされる沈床桁の地盤反力の場合も，式(68)，(69)がそのまま成立するとすると，係数 a，mは次のようになる。

(i)　線形地盤の場合

$$a=0.2N_{spt},\quad m=1 \quad\cdots\cdots(70)$$

(ii)　非線形地盤の場合

$$a\fallingdotseq 0.51\cdot N_{spt}^{0.61},\quad m\fallingdotseq 0.5 \quad\cdots\cdots(71)$$

5.2　せん断力に関する反力係数 μ の決定

ここでは，沈床桁の両端におけるせん断力に関する反力係数 μ について考える。いま，沈床桁の端でのせん断力の最大値を $Q_{\max}$ とし，$Q_{\max}$ になるときの鉛直変位を $y_{\max}$ とすると，次式が成立する。

$$Q_{\max}=\pm A\cdot\mu\cdot y_{\max} \quad\cdots\cdots(72)$$

一方，$Q_{\max}$ は沈床桁の端と地盤（捨石）との摩擦を考慮して，次のように表わせるとする。

$$Q_{\max}=\pm A\cdot K\cdot\sigma_{v0}'\cdot\tan\delta \quad\cdots\cdots(73)$$

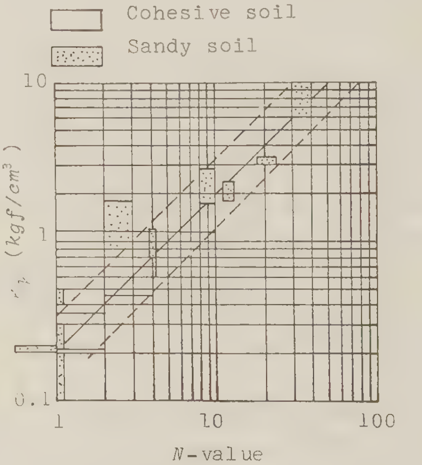


図５　くいの横抵抗試験から逆算した k_h 値（横山$^{6)}$）

Value of horizontal coefficient of soil reaction of pile after Yokoyama$^{6)}$

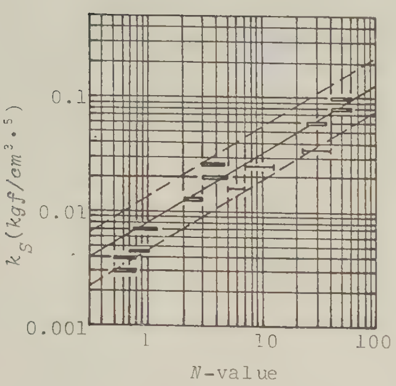


図 6　$\bar{N}$ 値と k_S 値との関係7)
Relationship between $\bar{N}$ value and k_S7)

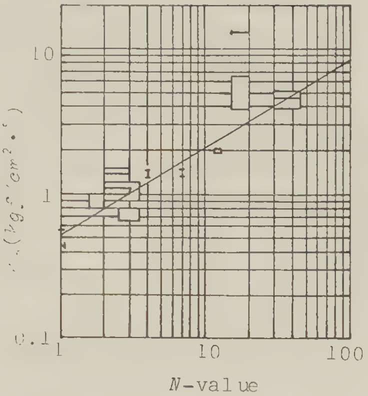


図 7　N 値と k_C 値との関係7)
Relationship between N value and k_C7)

ここに，K：土圧係数，σ_{v0}'：沈床桁の端での有効土かぶり圧，δ：沈床桁の端と地盤（捨石）とのせん断摩擦角である。

式(72)，(73)より，次式を得る。

$$\mu=\frac{K\cdot\sigma_{v0}'\cdot\tan\delta}{y_{\max}} \quad\cdots\cdots(74)$$

ここで，さらに，$y_{\max}$ は式(64)中の反力係数 a に反比例するとして，次のように表わす。

$$y_{\max}=\frac{1}{\mu' a}\quad(\mu'：定数)\quad\cdots\cdots(75)$$

これを式(74)に代入すると，結局，μ は次のように表わされる。

$$\mu=\mu'\cdot a\cdot K\cdot\sigma'_{v0}\cdot\tan\delta\quad\cdots\cdots(76)$$

ここで，反力係数 a と標準貫入試験のN値との関係式(70)，(71)を用いると，μ は次のようにに書ける。

(i)　線形地盤の場合

$$\mu=0.2\mu'\cdot N_{spt}\cdot K\cdot\sigma_{v0}'\tan\delta\quad\cdots\cdots(77)$$

(ii)　非線形地盤の場合

$$\mu=0.51\mu'\cdot N_{spt}^{0.61}\cdot K\cdot\sigma'_{v0}\cdot\tan\delta\quad\cdots\cdots(78)$$

さらに，式(75)において，$a=1$（線形地盤では，$N_{spt}\fallingdotseq 5$，非線形地盤では，$N_{spt}\fallingdotseq 3$）のとき，$y_{\max}=10$ cmと仮定すると，$\mu'=0.1$を得る。また，沈床桁の端と地盤（捨石）との摩擦角 δ を 15° とすると，式(77)，(78)は次のように書き直される。

(i)　線形地盤の場合

$$\mu=0.0054\cdot N_{spt}\cdot K\cdot\sigma_{v0}'\quad\cdots\cdots(79)$$

(ii)　非線形地盤の場合

$$\mu=0.014\cdot N_{spt}^{0.61}\cdot K\cdot\sigma_{v0}'\quad\cdots\cdots(80)$$

ただし，σ_{v0}' は〔kgf/cm²〕の単位である。

5.3　軸方向力の反力係数 ν と初期軸方向力 N_0 の決定

軸方向力の沈床桁の端での反力係数 ν について考える。砂地盤に打ち込まれた杭の先端抵抗とN値の関係は次のように表わされる。

$$R_u=4\cdot A\cdot N_{spt}\quad\cdots\cdots(81)$$

ここに，R_u：杭の先端抵抗（単位：kgf），A：杭の先端断面積（単位：cm²）である。

沈床の両端での軸方向力の最大値 $N_{\max}$ も式(81)と同様に表わされるとする。すなわち，

$$N_{\max}=4\cdot N_{spt}\cdot A\quad\cdots\cdots(82)$$

一方，この $N_{\max}$ が発生するときの軸方向変位を $u_{\max}$ で表わすと，次式が成立する。

$$N_{\max}=A\cdot\nu\cdot u_{\max}\quad\cdots\cdots(83)$$

式(82)，(83)より，ν は次のように表わされる。

$$\nu=\frac{4N_{spt}}{u_{\max}}\quad\cdots\cdots(84)$$

ここでも，ν は地盤反力係数 a に反比例するとして，次のように表わす。

$$u_{\max}=\frac{1}{\nu' a}\quad(\nu'：定数)\quad\cdots\cdots(85)$$

これを式(84)に代入して，結局，ν は次のように表わされる。

$$\nu=4\cdot\nu'\cdot a\cdot N_{spt}\quad\cdots\cdots(86)$$

ここで，反力係数 a とN値との関係式(70)，(71)を用いると，ν は次のように表わされる。

(i)　線形地盤の場合

$$\nu=0.8\nu'\cdot N_{spt}^2\quad\cdots\cdots(87)$$

(ii)　非線形地盤の場合

$$\nu=2\cdot\nu'\cdot N_{spt}^{1.6}\quad\cdots\cdots(88)$$

さらに，式(85)において，$a=1$（線形地盤で，$N_{spt}\fallingdotseq 5$，非線形地盤で $N_{spt}\fallingdotseq 3$）のとき，$u_{\max}=5$ cm とすると，$\nu'=0.2$ となる。このとき，式(87)，(88)は次のようになる。

(i)　線形地盤の場合

$$\nu=0.16N_{spt}^{2} \qquad\cdots\cdots(89)$$

(ii)　非線形地盤の場合

$$\nu=0.4N_{spt}^{1.6} \qquad\cdots\cdots(90)$$

ただし，式(89)，(90)を用いるときの軸方向力N，軸方向変位uの単位は〔kg$f$〕，〔cm〕である。

つぎに，沈床の両端における初期軸方向 N_{0a}，N_{0b} は次のように表わす。

$$\left.\begin{aligned} N_{0a}&=-(A\cdot K_0\cdot\sigma_{v0}')_a \\ N_{0b}&=-(A\cdot K_0\cdot\sigma_{v0}')_b \end{aligned}\right\} \qquad\cdots\cdots(91)$$

ここに，K_0：静止土圧係数，σ_{v0}'：有効土かぶり圧，である。

6.　解析結果と考察

6.1　解析条件

解析は，グリーン関数による場合と有限要素法による場合を行ったが，解析に用いた計算条件を述べる。表2に，解析に用いた係数値を示している。以後の計算において，特に断らない場合はこの表中の値を用いている。

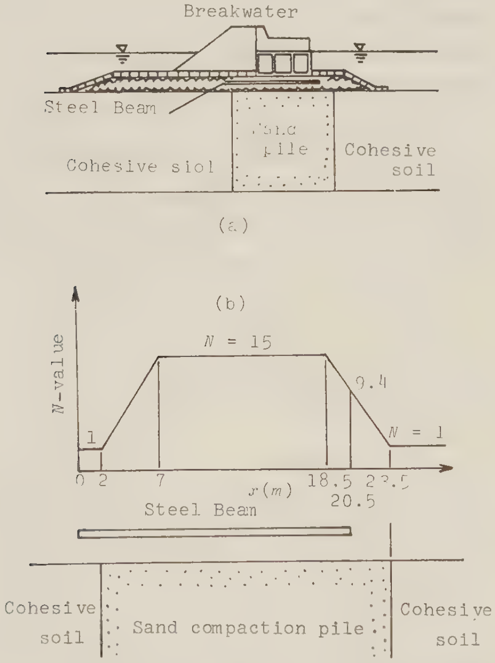


図 8　防波堤断面とN値の分布，（a）防波堤断面（b）N値の分布

(a) Section of breakwater, (b) distribution of N value of ground under the breakwater

表 2　解析に用いた係数値

Coefficient value used in the analysis

係数	記号	係数値
沈床桁のヤング率	E	2.1×10^{6} kgf/cm^2
沈床桁の断面2次モーメント	I	1.18×10^{5} cm^4
静止土圧係数	K_0	0.5
土圧係数	K	1.0
沈床桁の断面積	A	192.5 cm^2
沈床桁の高さ	h	58.8 cm
沈床桁の幅	B	30 cm
沈床桁の設置幅	P	70 cm

グリーン関数を用いた計算では，地盤は沈床桁の長さ方向に一様であるが，有限要素法の場合は，地盤状態が沈床桁の長さ方向に一様の場合と，変化する場合について計算を行っている。図8(a)は，地盤状態が沈床桁の長さ方向に変化する場合の対象とした想定地盤断面である。すなわち，地盤は防波堤下で粘性地盤中に砂強制置換が施されている。同図(b)はこの地盤で仮定した標準貫入試験のN値の分布を示している。砂強制置換部分の両端5 mでN値は粘性土部のN値から砂置換部のN値に漸時変化すると仮定している。

図9に，一様地盤の場合と地盤状態が変化する場合の計算に用いた地盤反力係数aの分布形状を示す。地盤反力係数mは，式(70)，(71)に示したように地盤全体にわたって一定としており，線形地盤の場合は1，非線形地盤の場合は0.5である。地盤反力係数aは式(70)または式(71)を用いて，N値から計算される。地盤のN値が図8(b)のように変化する場合，式(71)より，地盤反力係数

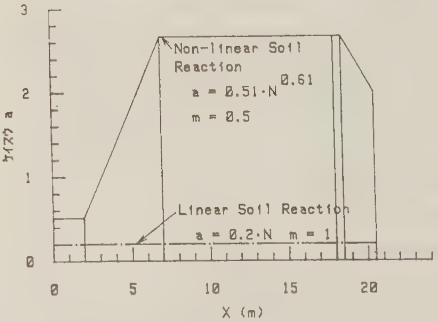


図 9　地盤反力係数aの分布

Distribution of coefficient of soil reaction, a

a を求めると図9に示したような折線分布にはならないが，ここでは簡単のため，図8(a)の N 値の分布図の析れ点のみの a を式(71)から計算し，他の点は直線で結んでいる。

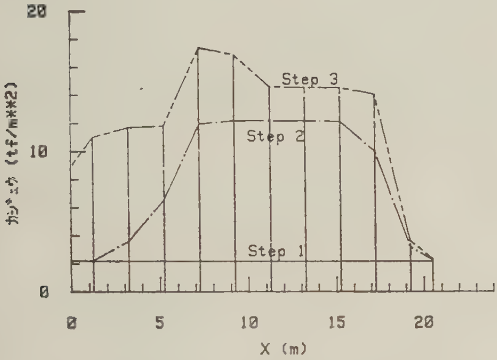


図 10　計算に用いた各段階での荷重分布

Load distribution of three steps used in the analysis

図10は，計算に用いた荷重分布形状を示している。計算には3段階の荷重分布を用いたが，これをステップ1，ステップ2，ステップ3と呼ぶことにする。図から分かるように，ステップ1は等分布荷重であり，ステップ2，3は沈床桁の長さ方向に変化する分布をしている。式(91)で初期軸方向力 N_0 を計算する際，用いる有効土かぶり圧 σ_{v0}' として，同図に示した荷重分布の両端

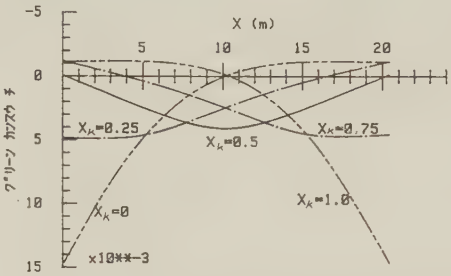
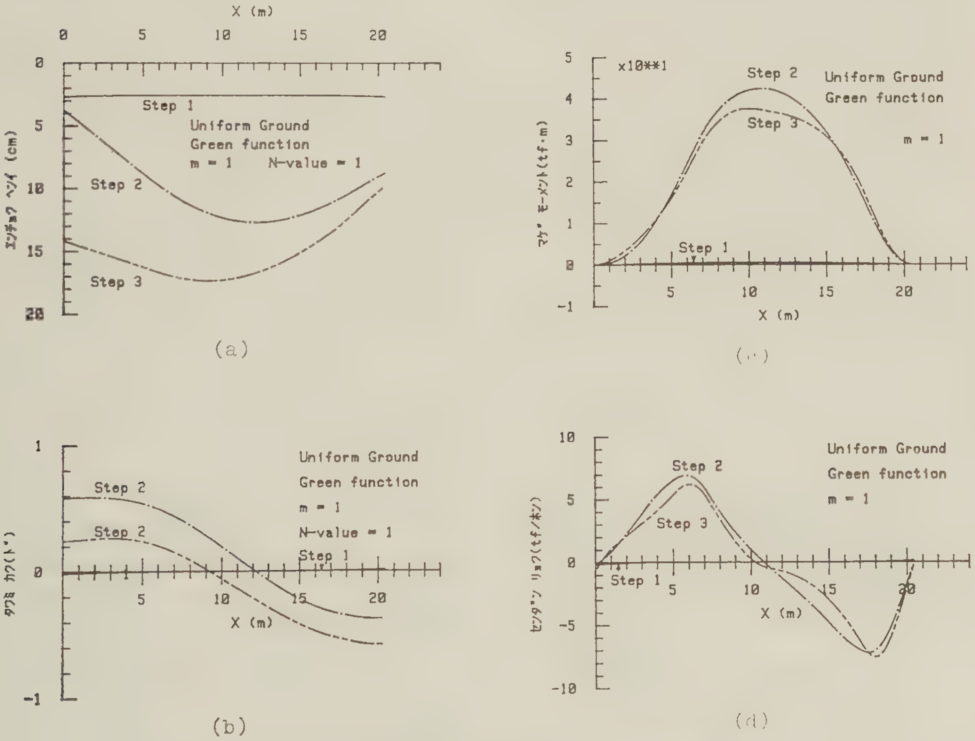


図 11　各 X_k 値に対するグリーン関数の分布

Distribution of value of Green's function



(a)　(c)

(b)　(d)

図 12　グリーン関数を用いた沈床桁の計算結果（N値=1）
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

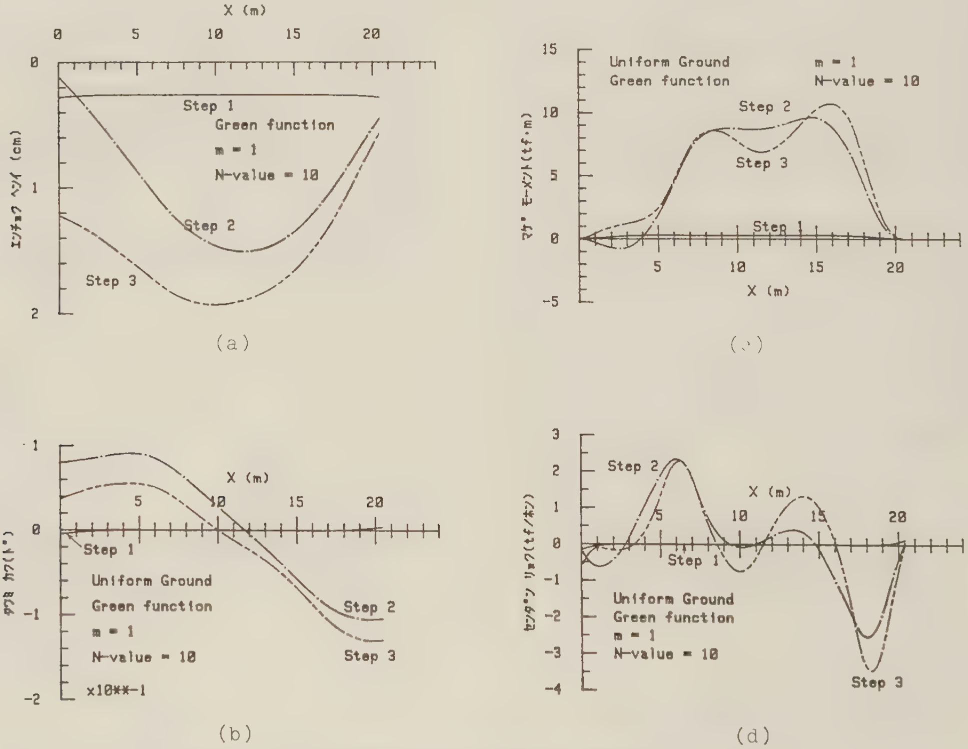
Behaviour of steel beam calculated by Green's function for N value of ground equal to 1, (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

の値を用いた。

6.2　グリーン関数を用いた解析結果

計算は沈床桁を 100 等分して，各点の値を計算機により計算した。図11は，式(43)，(44)を用いて計算した種々の X_k $(=x_k/l)=0$，0.25，0.50，0.75，1.00の値に対するグリーン関数値の分布形を示したものである。グリーン関数の分布形は $X=X_k$ に単位の集中荷重が作用したときの沈床桁の変位状態を表わしていると考えることができる。図より，$X_k=0$と1.0の場合及び $X_k=0.25$と0.75の場合は沈床桁の中央に関して対称の分布形をしており，$X_k=0.5$に対する分布形は沈床桁の中央に関して対称となっており，解析解の妥当性を裏づけている。ただし，これらの曲線において，グリーン関数値が負になっている部分があるが，この部分は地盤反力が引張りの部分である。ここでは，このような引張りが生じている部分についてもこの部分の反力をゼロにするような特別な措置は行っていない。しかし，以後に示す分布荷重に対する計算結果では，このうな引張りの生じている部分は発生していない。

図12に，地盤のN値が1（$a=0.2$，$m=1$）の場合の計算結果を示す。同図(b)は鉛直変位の分布形を示しているが，ステップ1は等分布荷重であるため，一様な沈下を示している。ステップ2，ステップ3と荷重が増加するに従い，沈下も増加しており，その分布形も図10に示した荷重の分布形に対応している。同図(a)はたわみ角の分布形であるが，ステップ1では全長にわたり，ほとんどゼロを示している。ステップ2，3では，同図(b)の変位の分布形に対応して妥当な値を示している。同図(c)は曲げモーメントの分布形である。境界条件として与えているように，両端で曲げモーメントはゼロとなっている。また，ステップ1では全長にわたり，曲げモーメントは非常に小さい値を示している。同図(d)はせん断力の分布形を示している。ステップ1では全長にわたり非常に小さい値を示している。また，いずれの荷重ステップでも両端のせん断力は非常に小さい。すなわち，式(79)より求めた反力係数により式(25)，(26)の第2式で計算した沈床桁の両端でのせん断力の影響はステップ2，ス



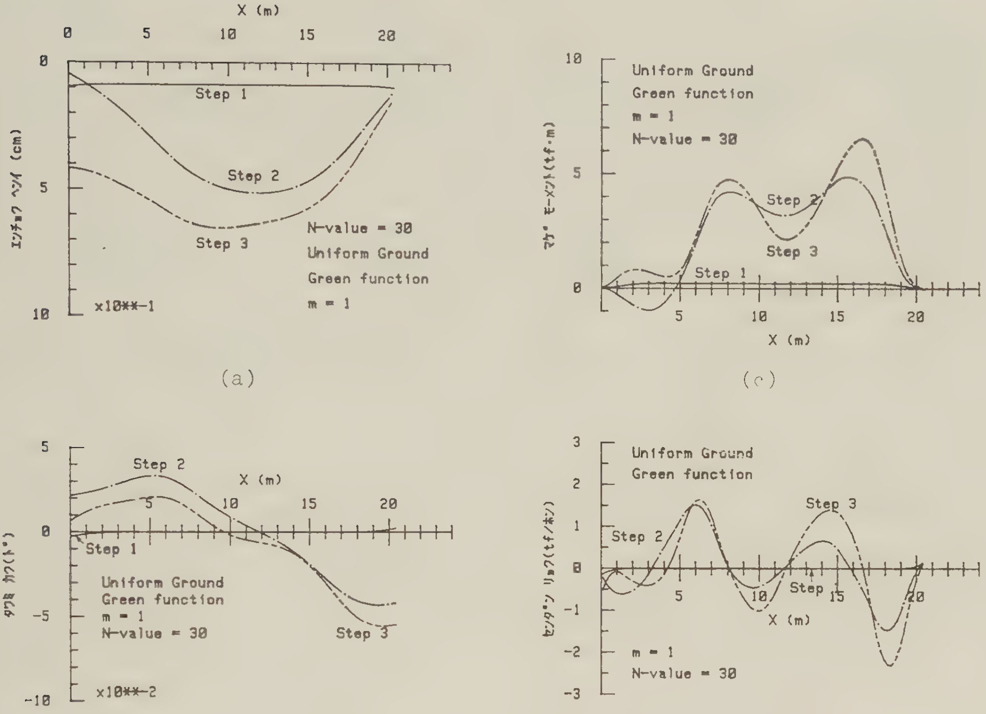
(a)　(c)

(b)　(d)

図 13　グリーン関数を用いた沈床桁の計算結果（N値＝10）

(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Behaviour of steel beam calculated by Green's function for N value of ground equal to 10, (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force



(a)　(c)

(b)　(d)

図 14　グリーン関数を用いた沈床桁の計算結果（N値＝30）
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Behaviour of steel beam calculated by Green's function for N value of ground equal to 30, (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

テップ3程度の荷重に対して非常に小さいことが分る。

図13は，地盤のN値が10（$a=1$，$m=1$）の場合のグリーン関数による計算結果である。図12の各種の分布形と比べ，鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力ともに小さくなっている。すなわち，N値の増加により，地盤が硬くなるため，沈床桁に生じる断面力は減少することがわかる。特に，曲げモーメントの分布形はN値が1の場合に比べ，極大値を2個もつ形になっており，これは地盤が硬くなることにより，荷重分布の影響を敏感に反映しているものと思われる。曲げモーメントの分布形状の変化にともないせん断力の分布形も極大値を2個ないし3個もつ形状となっている。

図14は，地盤のN値が30の場合の計算結果である。図から分るように，ステップ2，ステップ3の分布形状は図13の場合に比べさらに強調されて，曲げモーメント，せん断力の分布形状が複雑になっている。また，各値も小さくなっている。

図12，13，14より，一様地盤の場合，N値が増加して地盤が硬くなるに従って，ステップ2，ステップ3の場合のように複雑な分布形状をした荷重分布に対しては，曲げモーメント，せん断力などの分布形状はその荷重分布形状に従って複雑になることが分る。また，鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力はいずれも地盤のN値が増加するに従い小さくなる。

図15(a)，(b)，(c)，(d)に，それぞれ計算より得られた沈床桁の最大鉛直変位，最大曲げモーメント，最大せん断力及び最小せん断力と地盤のN値の関係を示す。いずれも両対数紙上で直線に近い形でN値の増加とともに減少している。

6.3　有限要素法による解析結果

6.3.1　解析結果の分類

ここでは，有限要素法を用いた解析結果を示す。計算は表3に示した4種類について行っている。表中の基本式の欄のタイプAは，沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない場合で，2.1で述べた方法により計算したもの

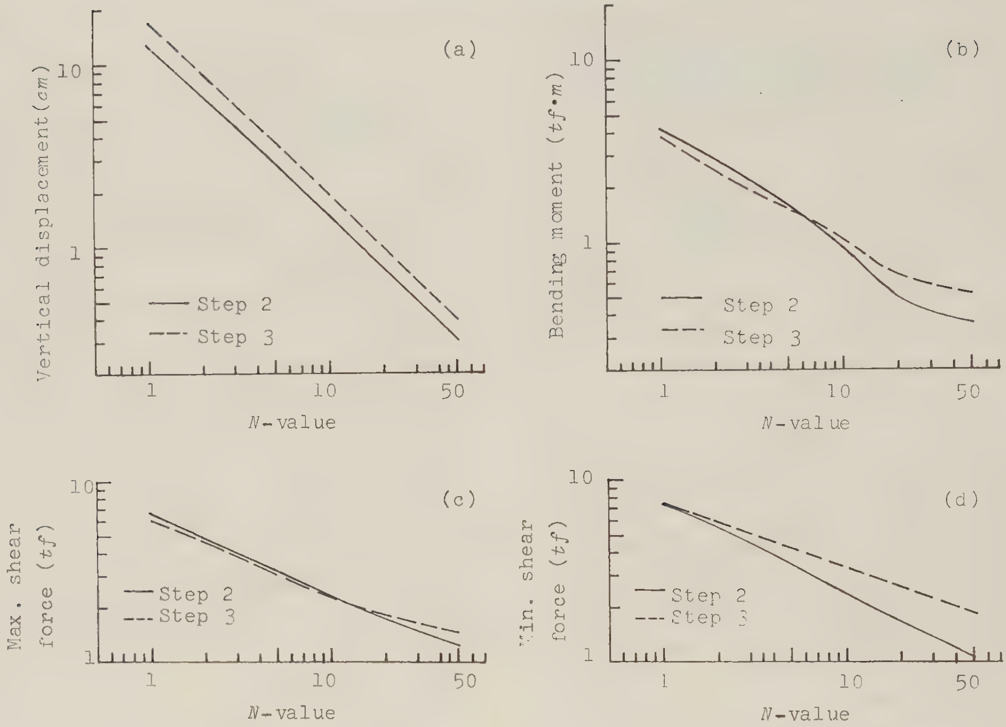


図 15　(a)　最大鉛直変位とN値の関係，(b)　最大曲げモーメントとN値の関係，(c)　最大せん断力とN値の関係，(d)　最小せん断力とN値の関係

Variation of (a) maximum deflection, (b) maximum bending moment, (c) maximum shearing force, (d) minimum shearing force with N value of ground

表 3　解析結果の分類

Classification of results calculated by the finite element method

分　類	基　本　式*	地 盤 状 態	m
1	タ　イ　プ　A	一　　様	1
2	タ　イ　プ　B	一　　様	1
3	タ　イ　プ　A	変　　化	0.5
4	タ　イ　プ　B	変　　化	0.5

* タイプA：沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない

タイプB：沈床桁の上，下面のせん断力を考慮する

である。同表中のタイプBは，沈床桁の上，下面のせん断力を考慮する場合で，**2.2** で述べた方法により計算したものである。計算は基本式タイプA，Bに対してそれぞれ ① 地盤反力が鉛直変位に対して線形の場合（$m=1$）でかつ，地盤状態は沈床桁の長さ方向に変化しない場合と，②地盤反力が鉛直変位に対して非線形な場合（$m=0.5$）で，かつ，地盤状態が沈床桁の長さ方向に変化する場合，の両方の場合について計算している。地盤状態が沈床桁の長さ方向に変化する場合の計算に用いた地盤の概況は，既に図8に示した通りである。このときの地盤反力係数の分布形状は図8から式(70)，(71)より求めた図9のものを用いている。また，計算に用いた荷重分布は，グリーン関数法による場合と同じで，図10に示した3種類を用いている。ここでも，図10に示したように，荷重段階をステップ1，ステップ2，ステップ3と呼ぶことにする。なお，表3に示した4種類の各場合に対して，**4.2** で示した3種類の内そうモデル，すなわち，①4節点3次A要素（4-3-Aと略称），②2節点3次B要素（2-3-Bと略称），③2節点5次C要素（2-5-Cと略称），を用いて計算した。計算には，図16に示すように，沈床桁を21個に分割したものを用いた。各要素の長さは要素番号19を除き1mである。要素番号19は0.5mである。

6.3.2　線形地盤反力の地盤に対する計算結果

ここでは，地盤反力が鉛直変位に比例する場合（$m=$

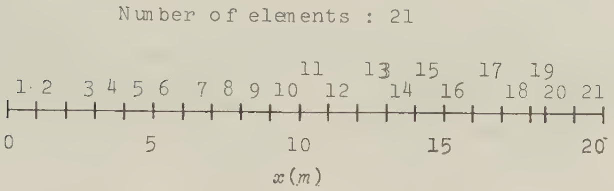
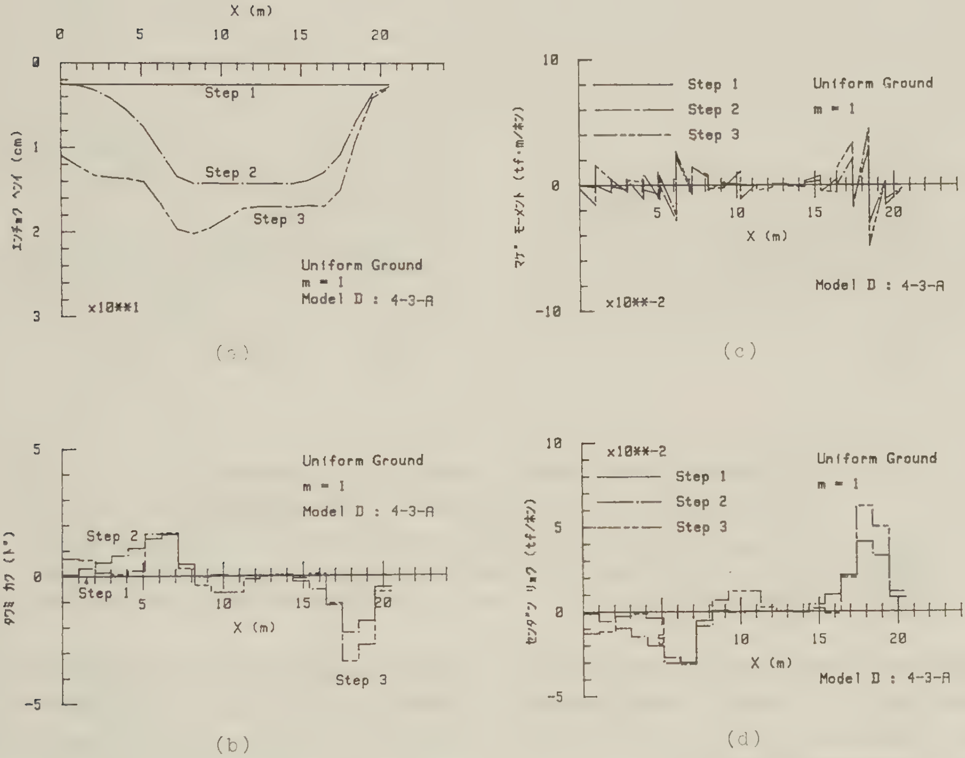


図 16　沈床桁の要素分割
Element division of steel beam



(a)　(c)

(b)　(d)

図 17　有限要素法による計算結果（一様地盤，$m=1$，4-3-Aモデル），
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Behaviour of steel beam on the uniform ground with linear soil reaction calculated by the finite element method using the interpolation model of 4 nodes-3rd ordered A model, (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

1）の計算結果を示す。表3において，分類1と分類2の場合がこれに対応する。

図17は，表3の分類1の場合，すなわち，一様地盤で地盤反力が鉛直変位に線形（$m=1$）で，かつ，4節点3次A要素を用いた場合の計算結果である。要素内の鉛直変位の内そう近似式は3次であるため，たわみ角，曲げモーメント，せん断力はそれぞれ2次式，1次式，定数となる。同図(a)より，鉛直変位は各要素内ではほぼ直線的となっており，したがって，たわみ角は一定となっている。鉛直変位は3次式により内そうされているため，要素内で鉛直変位が直線分布する必要がないにもかかわらず，このような分布形状をしているのは次の理由によるものと思われる。4節点3次A要素モデルでは，要素端の節点において，変位の連続性は保障されているが，たわみ角，曲げモーメント，せん断力の連続性は保障されていない。このため，この要素端の節点が曲げ抵抗のないヒンジのような状況を呈している。このことは，同じ地盤条件，荷重条件で計算しているグリーン関数によ

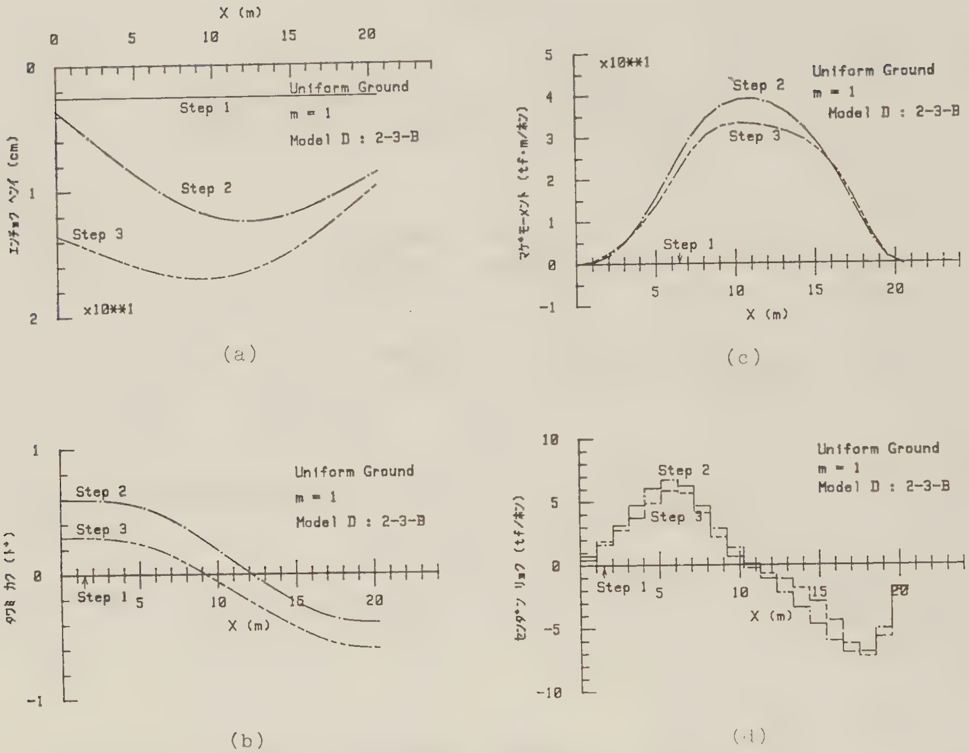


図 18　有限要素法による計算結果（一様地盤，$m=1$，2-3-Bモデル），
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Behaviour of steel beam on the uniform ground with linear soil reaction calculated by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-3rd ordered B element, (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

る解析解の結果（図12(c)）及び後に示す要素端でたわみ角の連続性を考慮に入れた内そうモデルによる計算結果（図18(c)，図19(c)）に比べても曲げモーメントの値が極端に小さいことからもうなづける。

図18は，図17の場合と同じ条件（タイプA，一様地盤，$m=1$）に対して，2節点3次B要素を用いた計算結果である。このモデルでは，要素端の節点において，鉛直変位とその1回微係数であるたわみ角の連続性が保たれている。図より，鉛直変位及びたわみ角はほぼ滑らかに分布している。鉛直変位の内そう式が3次であるため，その2回微係数より計算される曲げモーメントは要素内で直線的，3階微係数から計算されるせん断力は定数となる。他方，一様分布荷重であるステップ1に対しては鉛直変位は一定で，たわみ角，曲げモーメント，せん断力は沈床桁の全長にわたり，ほぼゼロとなっている。

図19は，図17，図18と同じ条件に対して，2節点5次C要素を用いた計算結果である。この内そうモデルでは要素端において，鉛直変位，たわみ角，曲げモーメントの連続性が保たれている。せん断力は要素内で2次式で表わされる。計算結果はほぼ図18の2節点3次B要素の場合と同じ結果を示している。

つぎに，ここに示した3種類の内そうモデルによる結果とグリーン関数を用いた解析解の結果との比較を行う。図20に，荷重ステップ2に対する各計算結果を示す。同図(a)より，有限要素法による結果のうち，2-3-Bモデルと2-5-Cモデルによる結果はよく一致している。また，この結果とグリーン関数による解析解の結果を比較すると，後者がわずかに大きい鉛直変位を示しているが，実際問題としては一致しているとみてさしつかえない。他方，破線で示した4-3-Aモデルによる結果は他の結果に比べ，かなり異っており，分布形状も滑らかでない。つぎに，同図(b)はたわみ角の分布であるが，グリーン関数を用いた解析解，2-3-Bモデル，2-5-Cモデルを

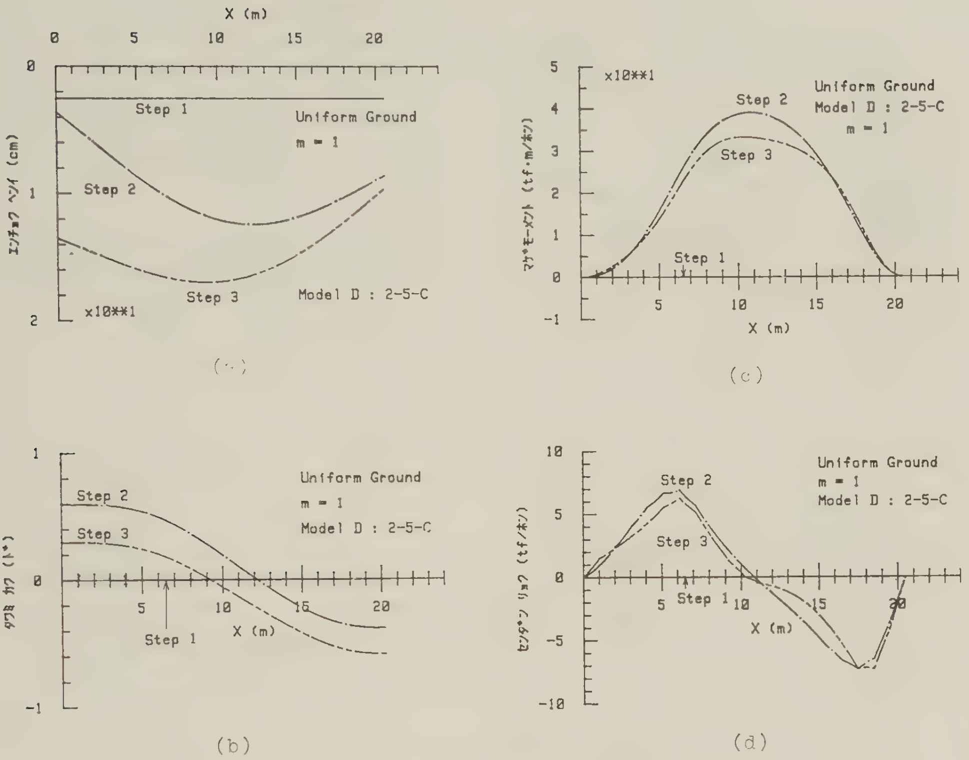


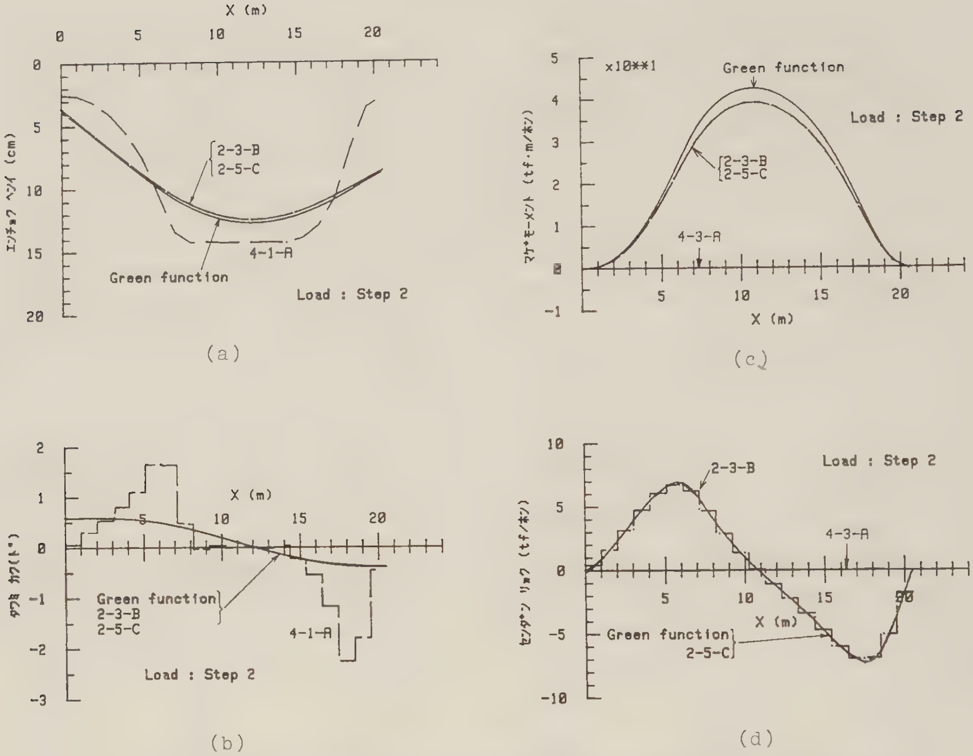
図 19　有限要素法による計算結果（一様地盤，$m=1$，2-5-Cモデル），
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Behavior of steel beam on the uniform ground with linear soil reaction calculated by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-5th ordered C element, (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

用いた有限要素法の結果は，沈床桁の全長にわたりほぼ一致している。ここでも，4-3-Aモデルによる結果は，他の結果とかなりずれている。同図(c)は曲げモーメントの計算結果である。2-3-Bモデル，2-5-Cモデルによる結果は沈床桁の全長にわたり，ほぼ一致している。グリーン関数を用いた解析解と比べ，これらの結果は少し小さい曲げモーメントの値を与えているが，有限要素法の場合は，曲げモーメントは，得られた鉛直変位の2回微係数より計算されることを考えると妥当な結果と言える。4-3-Aモデルによる有限要素法の結果は，他の結果に比べ無視できる程小さい曲げモーメントしか与えていない。これは，図17で説明したのと同じ理由によるものである。同図(d)はせん断力の分布の比較である。グリーン関数による解析解の結果と2-5-Cモデルによる有限要素法による結果は，沈床桁の全長にわたりほぼ一致している。また，2-3-Bモデルによる結果も平均的には，上の結果と一致しているとみなせる。4-3-Aモデルによる有限要素法の結果は他の場合に比べ，無視できる程度のせん断力しか示していない。

以上，各内そうモデルによる有限要素法による解析結果及びグリーン関数による解析解の結果との比較検討により，つぎのことが判明した。すなわち，1）2-3-Bモデルと2-5-Cモデルによる計算結果はほぼ同じ結果を与える。2）2-3-Bモデルと2-5-Cモデルによる有限要素法の結果は，グリーン関数による解析解の結果ともほぼ同じ結果を与え，計算結果は妥当なものと思われる。2）4-3-Aモデルによる有限要素法の結果は他の方法による結果とかなり異なり，特に，鉛直変位の高階微係数より計算される曲げモーメント，せん断力は他の結果に比べ，無視し得る程，小さい値しか与えない。以上により，4-3-Aモデルによる有限要素法の結果は十分妥当な結果を与えない。

つぎに，基本式を**2.2**で求めた沈床桁の上，下面のせん断力を考慮するタイプBで，地盤反力は鉛直変位に線



(a)　　(c)

(b)　　(d)

図 20　グリーン関数法による解析解と有限要素法による結果との比較（タイプＡ，一様地盤）
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Comparison of analytical result by Green's function with the one by the finite element method (Type A, uniform ground), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

形（$m=1$）で，かつ，地盤状態は沈床桁の延長方向に一様な場合（表３の分類２）の計算結果を示す。前の解析で，4-3-Aモデルでは十分妥当な結果が得られないことが分ったので，ここでは，4-3-Aモデルの結果は省略する。図21は，2-3-B要素による有限要素法の計算結果である。基本式2-3-Bでは，鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力に加え，軸方向変位と軸方向力が求まる。図21(a)，(b)，(c)，(d)，(e)，(f)にそれぞれの結果を示している。同図(a)，(b)，(c)，(d)の鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力の結果は，対応する基本式タイプＡの図18(a)，(b)，(c)，(d)の結果と沈床桁の全長にわたりほぼ一致する。同図(e)は軸方向変位の分布であるが，いずれの荷重ステップにおいてもほぼ一定値を示している。荷重ステップ１と２では非常に小さい軸方向変位を示しているが，荷重ステップ３では，これらに比べ，かなり大きな値を示している。これは，図10に示した荷重分布において，荷重ステップ３では，左右端の荷重圧の差異が他に比べ大きいことによると思われる。同図(f)は，軸方向力の分布であるが，一様分布荷重であるステップ１では一様な軸方向力（圧縮）を示している。他の場合は，荷重の分布形状に従って変化している。しかし，全体として軸方向力による応力（荷重ステップ３で最大値は約 $1\,\mathrm{t/m^2}$）は曲げによる応力（荷重ステップ３で最大値は約 $8\times10^3\,\mathrm{t/m^2}$）に比べ，無視し得る程小さいものである。

図22は，図21と同じ条件（表２の分類２）に対し，２節点５次Ｃ要素モデルを用いた有限要素法の計算結果である。同図(a)，(b)，(c)，(d)に示した鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力の分布は図19に示した基本式がタイプＡの場合の同じ内そうモデルによる結果と沈床桁の全長にわたり，ほとんど一致する。また，同図(e)，(f)の軸方向変位，軸方向力の結果も含めて，図22の全部の結果は，図21の２節点３次Ｂ要素モデルによる結果とほとんど一致する。

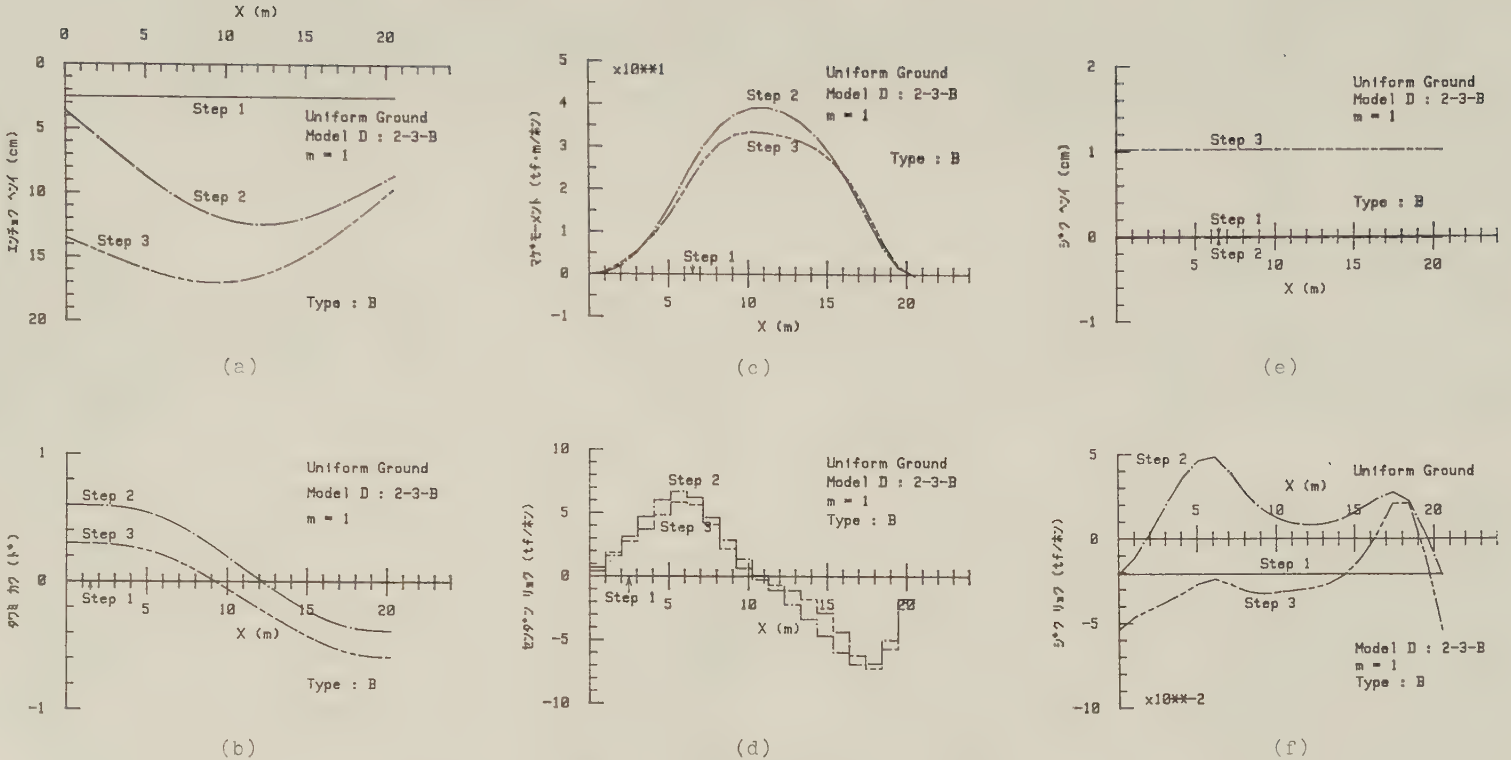
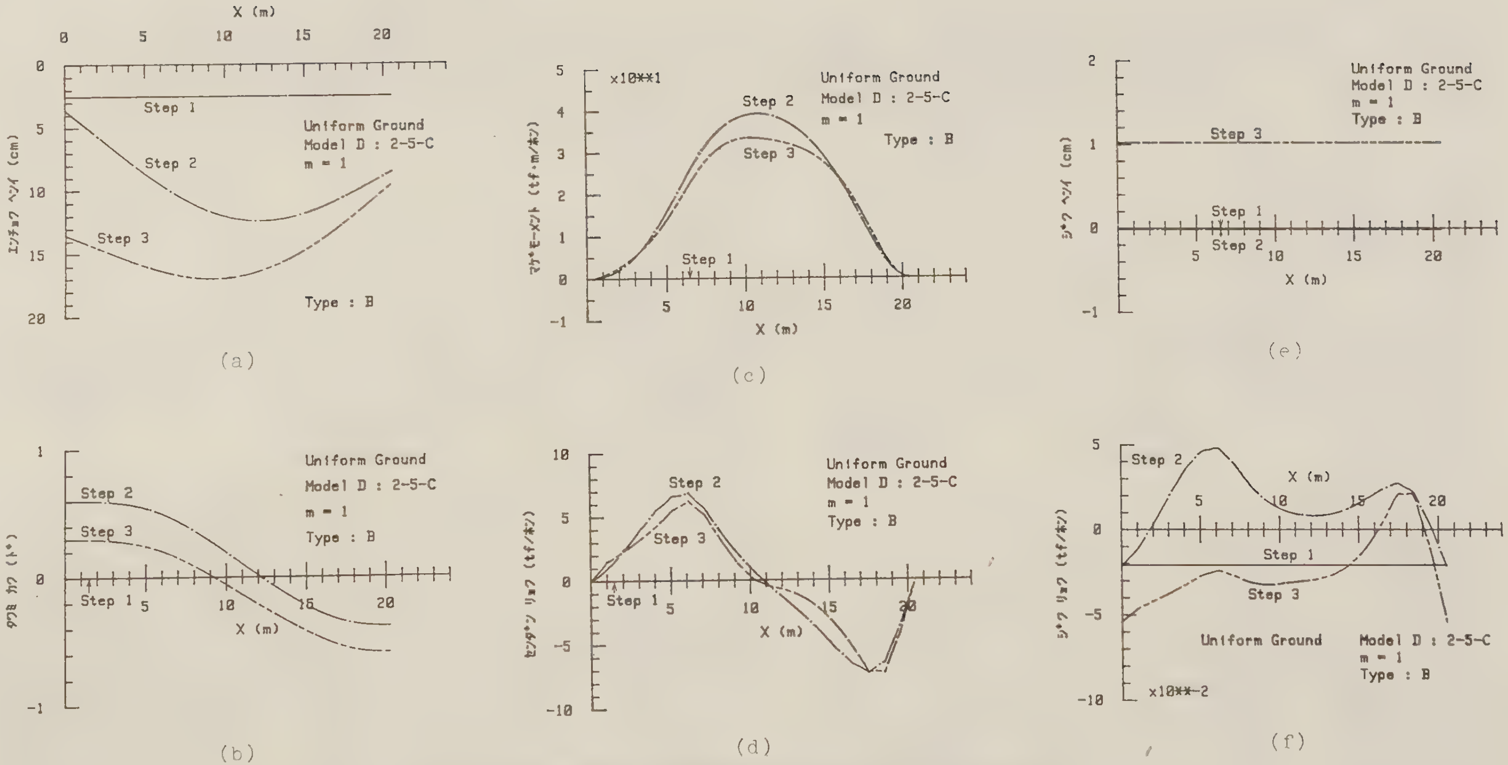


図 21 有限要素法による解析結果（2 節点 3 次 B 要素モデル）

(a) 鉛直変位, (b) たわみ角, (c) 曲げモーメント, (d) せん断力, (e) 軸方向変位, (f) 軸方向力

Calculated result by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-3rd ordered B element (Class 2), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force, (e) axial displacement, (f) axial force



同 22　有限要素法による解析結果（分類2，2節点5次C要素）
(a) 鉛直変位，(b) たわみ角，(c) 曲げモーメント，(d) せん断力，(e) 軸方向変位，(f) 軸方向力

Calculated result by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-5th o·dered C element (Class 2), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force, (e) axial displacement, (f) axial force

以上により，分類２の計算結果より次のことが判明した。１）ここに示したタイプＢの計算結果のうち，鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力は対応するタイプＡの計算結果とほぼ一致する。２）2-3-Ｂモデルの結果と2 5-Ｃモデルの結果は，鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力，軸方向変位，軸方向力のすべての項目について，ほぼ一致する。

6.3.3 非線形地盤反力の地盤に対する計算結果

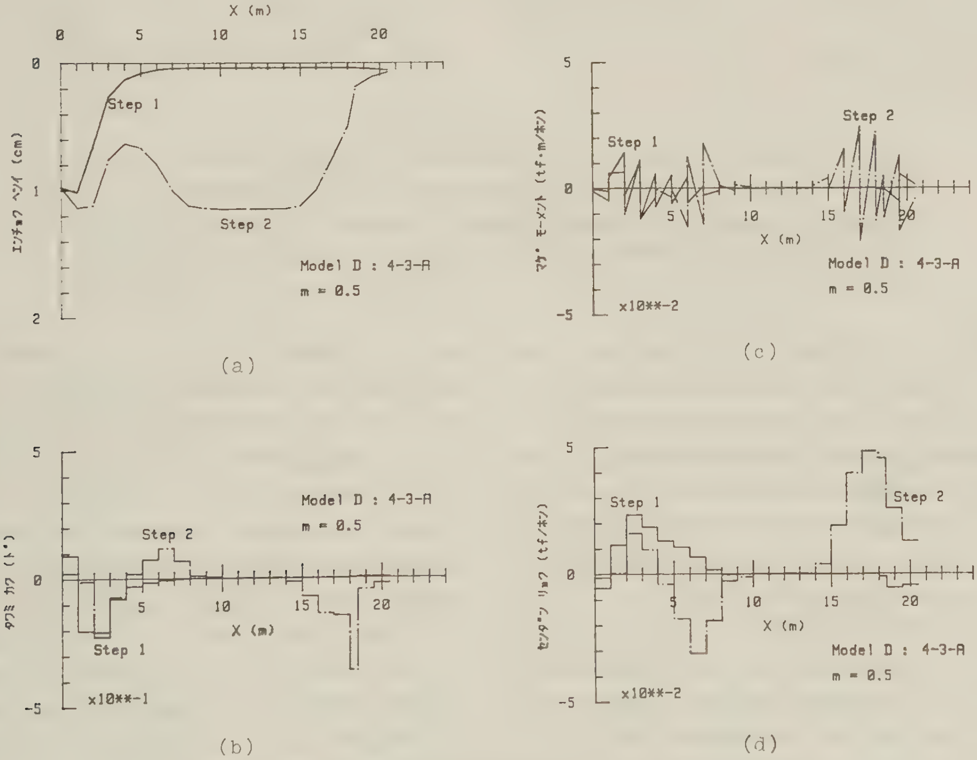
ここでは，地盤反力が沈床の鉛直変位の平方根に比例する場合（$m=0.5$）で，図９で実線で示したように，地盤反力係数が沈床の延長方向に変化する場合の計算結果を示す。すなわち，表３の分類３の場合と分類４の場合を扱う。実際の計算に当っては，解くべき微分方程式が非線形であるため，各要素での変位が所定の許容誤差の範囲内に入るようにくり返し計算を行っている。すなわち，

$$\frac{y_n - y_{n-1}}{y_n} < \delta \quad \cdots\cdots(92)$$

ここに，y_{n-1}，y_n は第（$n-1$）回目及び第n回目のくり返しにより得られた鉛直変位である。δは許容相対誤差で，計算では，0.001を用いている。

図23は，表３の分類３の場合，すなわち，地盤状態が沈床桁の延長方向に変化し，沈床桁の上，下面のせん断力を考慮しない場合の，4-3-Ａモデルを用いた計算結果である。同図(a)より，この場合も各要素内で鉛直変位はほぼ直線的で，たわみ角は一定となっている。これは図17に示した分類１の場合と同じである。このため，同図(c)の曲げモーメント，同図(d)のせん断力の値は，後に示す2-3-Ｂモデル，2-5-Ｃモデルの場合（図24，25）に比べ極端に小さくなっている。この理由は図17の場合と同じである。

図24は，図23と同じ条件，すなわち，表３の分類３で2-3-Ｂモデルを用いた場合の解析結果である。同図(a)は鉛直変位の分布であるが，滑らかな曲線となっている。また，荷重ステップ１は，等分布荷重であるが地盤のN値の分布形状を反映して，一様変位ではなく，xが小さ



(a) (c)

(b) (d)

図 23　有限要素法による解析結果（分類３，４節点３次Ａ要素）
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Calculated result by the finite element method using the interpolation model of 4 nodes-3rd ordered A element (Class 3), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

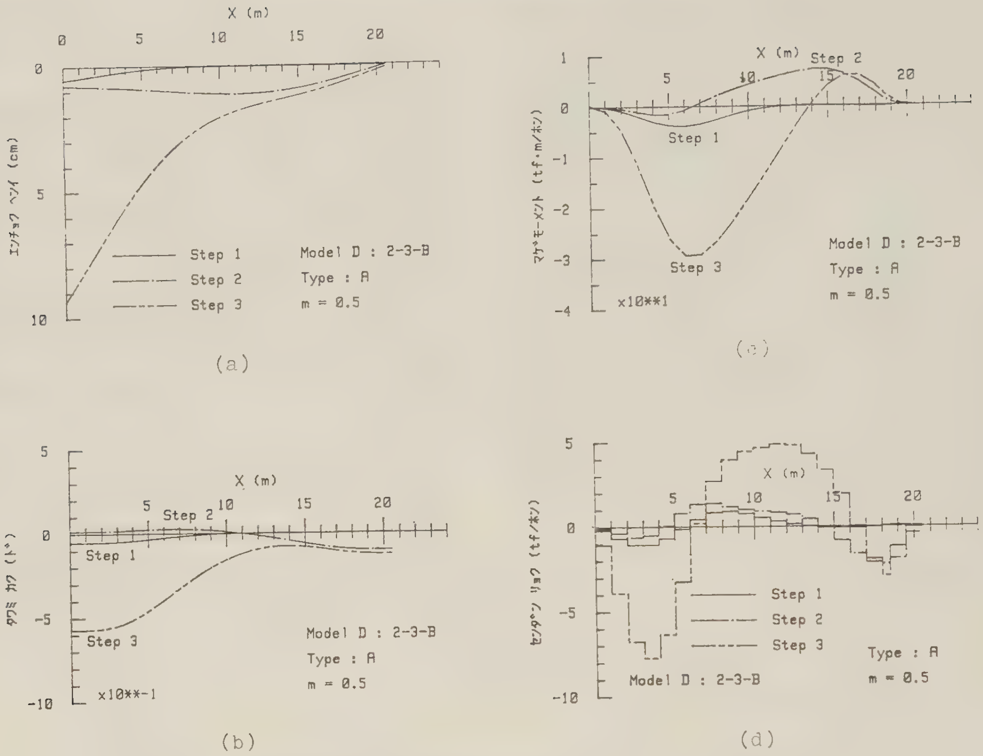


図 24　有限要素法による解析結果（分類３，２節点３次Ｂ要素）
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Calculated result by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-3rd ordered B element (Class 3), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

くなるに従い，変位が増加している。荷重ステップ３では，$x=0$ 付近の荷重の増加とN値の減少により，xが小さくなるに従い，鉛直変位は急激に増加している。一様地盤の場合（図18(a)）に比べても，鉛直変位の分布形が大きくなり，地盤の不均一性の影響がでていることが分る。また，地盤反力が鉛直変位に対して非線形であるため，荷重ステップの進行にともなう鉛直変位の増加の割合は図18(a)の場合に比べ非常に大きくなっている。同図(b)はたわみ角の分布であるが，ステップ３では荷重が大きく，かつ，地盤の不均一性のため，沈床桁の全長にわたり，負のたわみ角となっている。同図(c)に，曲げモーメントの分布形状を示す。図18(c)に示したように，一様地盤では沈床桁の全長にわたり，曲げモーメントは正であったが，同図(c)に示したように，この計算結果ではステップ１の等分布荷重に対して負の値を示している。すなわち，xが小さい部分において，沈床桁が片持梁的な役割を果して，この付近の荷重の一部を沈床桁が支持していることが分る。ステップ３ではこの傾向はさらに著しくなっている。同図(d)はせん断力の分布を示しているが，xの小さい部分で大きな負のせん断力が発生しており，この部分で沈床桁が片持梁のような役割を果して，上載荷重の一部を支えていることが分る。

図25は，図23，図24と同じ条件に対して，2-5-Cモデルを用いた有限要素法による計算結果である。鉛直変位の内そうモデルが５次であるので，たわみ角，曲げモーメント，せん断力がそれぞれ４次，３次，２次式で内そうされる。図24(d)のせん断力の各要素内での分布形状が異なるが，平均的にみれば，図25の各項目の計算結果は，図24の結果とほとんど一致する。したがって，各項目の特徴も，図24の場合と同じである。

つぎに，表３の分類４に対する計算結果を示す。分類４では，**2.2** に示したように，沈床桁の軸方向変位，軸方向力も考慮に入れた解析となっている。ここでは，図23でみたように，4-3-Aモデルは妥当な結果を与えない

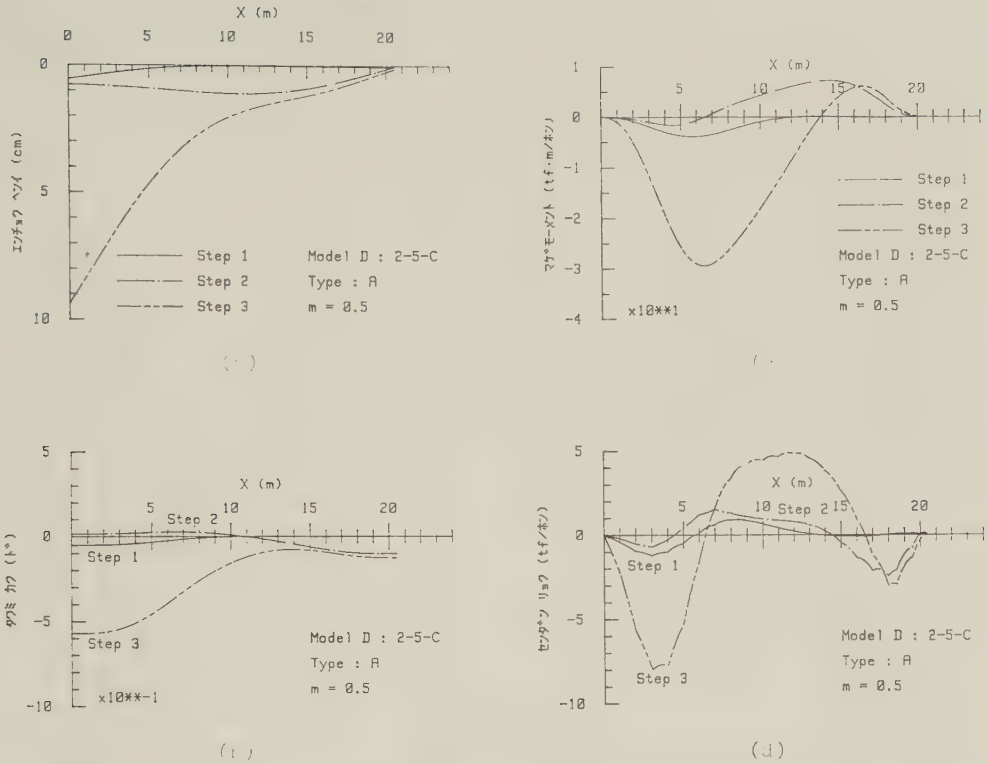


図 25　有限要素法による解析結果（分類3，2節点5次C要素）
(a)　鉛直変位，(b)　たわみ角，(c)　曲げモーメント，(d)　せん断力

Calculated result by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-5th ordered C element (Class 3), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force

ことが分ったので，これを省略する。図26に，分類4の条件に対し，2-3-Bモデルを用いた有限要素法の計算結果を示す。同図(a)，(b)，(c)，(d)の鉛直変位，たわみ角，曲げモーメント，せん断力の分布形状は，図24に示した分類3の場合とほとんど一致する。したがって，計算結果の特徴は図24の場合と同じである。同図(e)に軸方向変位の分布形状を示している。軸方向変位の分布形状は各荷重ステップとも沈床桁の全長にわたりほぼ一定となっている。また，ステップ3がステップ1，ステップ2に比べ大きな軸方向変位を示しているが，これは，図21(e)の場合にも述べたように，ステップ3の荷重分布は他の場合に比べ沈床桁の左右端において，その荷重強度が大きく異なることによるものと思われる。同図(f)に軸方向力の分布を示す。全荷重ステップとも，沈床桁の全長にわたり圧縮力を示している。また，ステップ3では，荷重分布の増加と地盤の不均一性のため，その分布形状が大きく変化している。しかし，図21でも述べたように，軸方向力により生じる沈床桁の応力は曲げによる応力に比べ，無視し得る程小さい。

図27に，図26と同じ分類4の条件で，2-5-Cモデルを用いた場合の計算結果を示す。鉛直変位，軸方向力ともに沈床桁の全長にわたり図26に示した結果とほとんど変わりない。したがって，計算結果の特徴も図26の場合と同じである。

7.　結　　論

本文において，防波堤下の鋼製桁沈床の挙動を予測するため，沈床桁の挙動を表わす基本式を求めるとともに，これのグリーン関数を用いた解析解及び変分原理を用いた有限要素法の定式化を示した。また，代表的ないくつかの条件に対して，これらの解析方法による計算結果を示すとともに，それらの比較検討を行った。これより，以下の結論が得られた。

1)　沈床桁の曲げモーメント，せん断力の他に軸方向

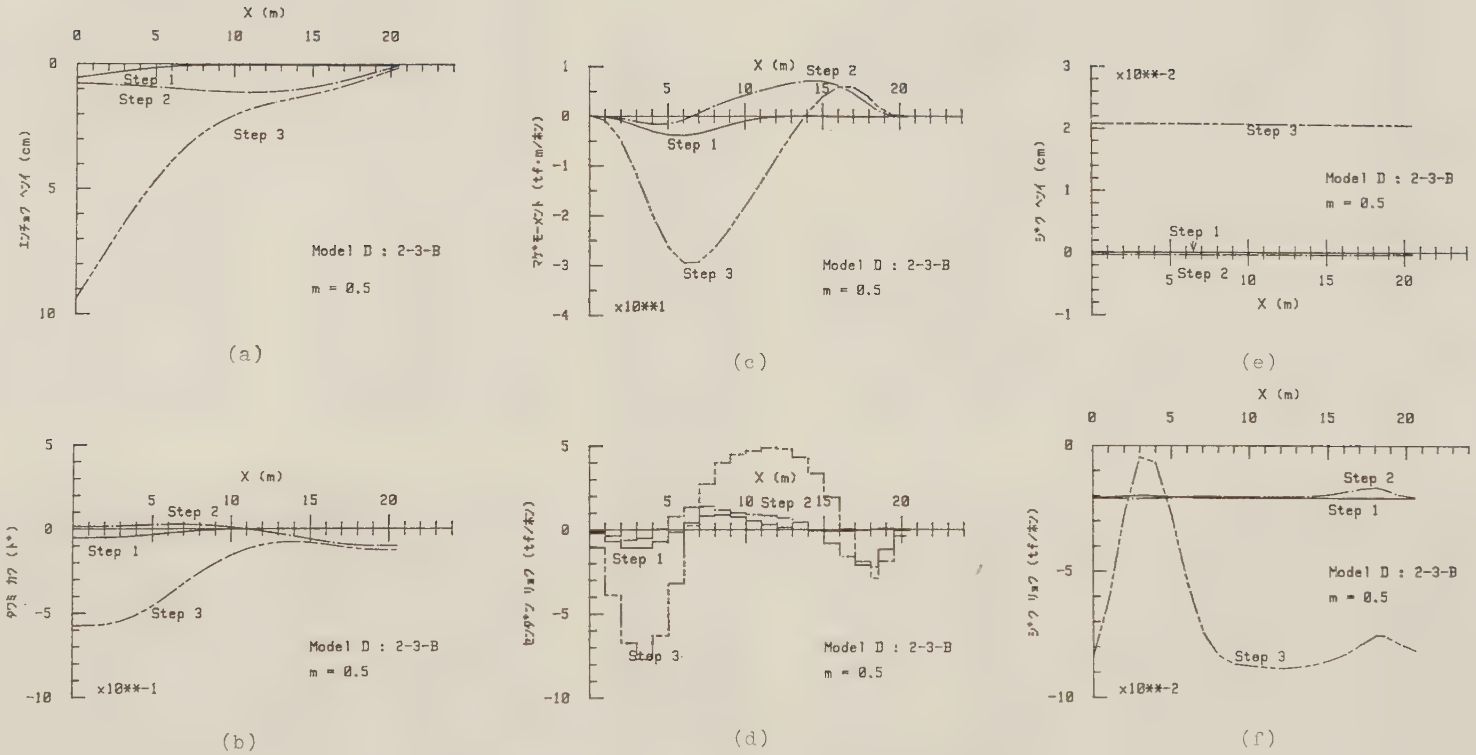
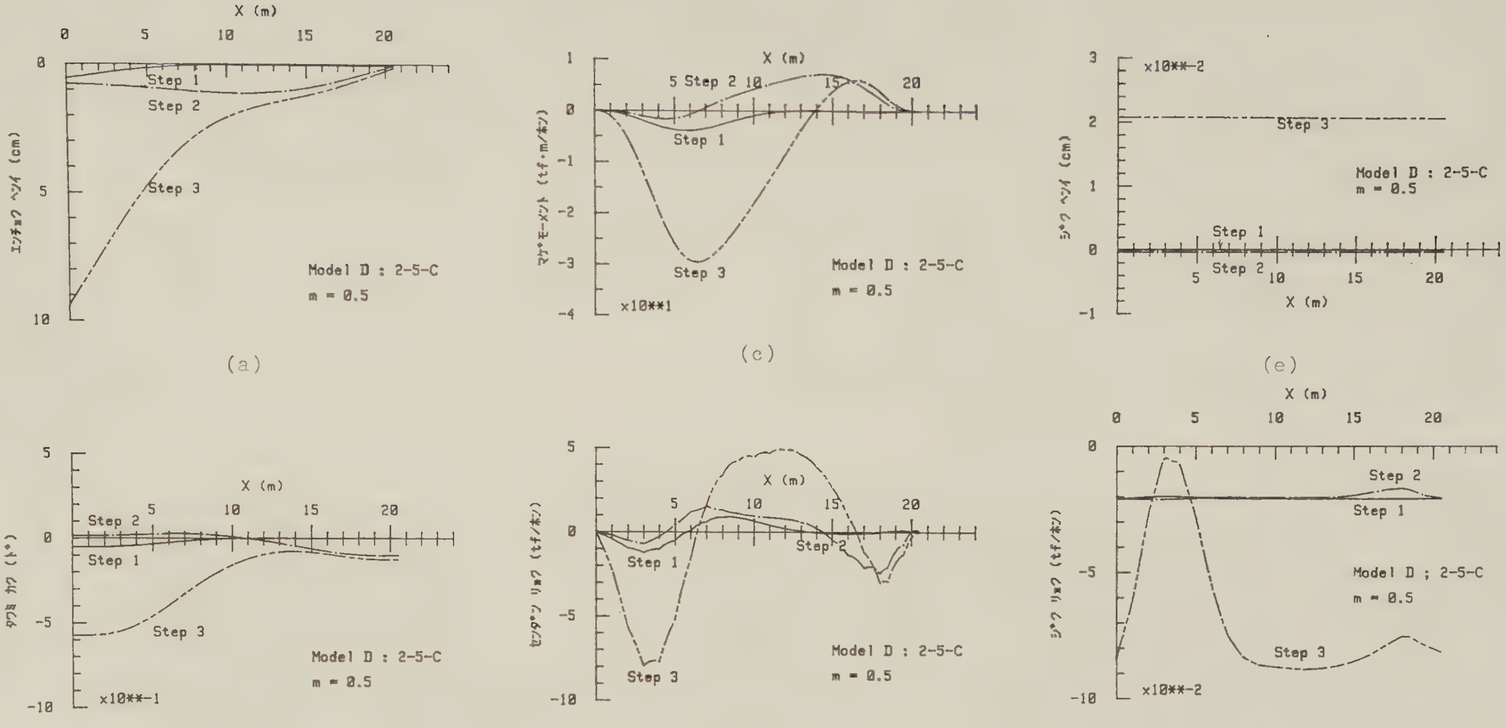


図 26 有限要素法による解析結果（分類 4，2 節点 3 次 B 要素）

(a) 鉛直変位，(b) たわみ角，(c) 曲げモーメント，(d) せん断力，(e) 軸方向変位，(f) 軸方向力

Calculated result by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-3rd ordered B element (Class 4), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force, (e) axial displacement, (f) axial force



(a) (c) (e)

(b) (d) (f)

図 27　有限要素法による解析結果（分類 4， 2 節点 5 次 C 要素）

(a) 鉛直変位，(b) たわみ角，(c) 曲げモーメント，(d) せん断力，(e) 軸方向変位，(f) 軸方向力

Calculated result by the finite element method using the interpolation model of 2 nodes-5th ordered C element (Class 4), (a) deflection, (b) inclination angle, (c) bending moment, (d) shearing force, (e) axial displacement, (f) axial force

力も扱えるように基本式を求め，いくつかの解析例を示した。しかし，沈床のような桁構造物では，部材に発生する曲げによる応力に比べ，軸方向力による応力は無視し得る程小さく，ここに示した解析法では，軸方向力を考慮してもしなくても部材断面決定には影響しない。

2）均一な線形地盤反力を有するとみなせる地盤に対して，グリーン関数による解析解が得られた。グリーン関数による解析解の特徴は，均質線形地盤であれば，任意の上載荷重の分布形状の解が求まることである。したがって，本手法は，地盤改良等を施こさない比較的沈床桁の延長方向に均質とみなせる地盤上の沈床桁の解析に対し比較的簡単に解を得る有効な方法と言える。

3）地盤の応力～ひずみ特性は一般に非線形であり，また，地盤改良等を施すことにより，沈床桁の延長方向に地盤定数が大きく変化する場合の解析が必要となる。このような場合に対してはここに示した有限要素法による方法が有効である。

4）グリーン関数を用いた解析解との比較検討から，沈床桁の解析に対し有限要素法を用いる場合，内そうモデルとしては，２節点３次Ｂ要素または，２節点５次Ｃ要素が適当である。

以上，本論文において得られた結論を述べた。本論文において，解析に必要な地盤反力に関する諸係数は，杭の軸直角方向支持力算定の際の反力係数より求めた。しかし，ここで示した方法は仮定的なものであり，十分な実測データの裏付けがない。今後，現場または室内試験の実測データとの比較検討により，信頼のおける反力係数の決定法を確立する必要がある。

参考文献

1）菅野典雄：石巻漁港Ｈ型沈床式西防波堤の設計と施工及び地盤改良に伴う原地盤の乱れについて(1)，第28回全国漁港建設技術研究発表会講演集，13～28，1983.

2）河上房義，佐式正雄，小川正二，伊藤驍，佐藤旺典：石巻工業港防波堤Ｈ型鋼沈床の応力測定とその解析，15～19，土と基礎，No. 511，1967.

3）山縣宣彦，中村信之，藤原嗣哲：苫小牧東港防波堤Ｈ型鋼沈床工の応力解析について，1629～1632，第15回土質工学研究発表会講演集，1980.

4）日野幹雄：境界値問題の解法，18～41，朝倉書店，1981.

5）藤野　勉：熱伝導と熱応力，コンピューターによる構造工学講座Ⅱ 4 B，日本鋼構造協会編，培風館，1972.

6）（社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，5—56～5—67，（社)日本港湾協会，1979.

7）6)と同じ，5—44～5—58.

〔付録１〕

① 基本解 $Y_1 \sim Y_4$ の微係数

$$\left.\begin{aligned}
&Y_1'=2\beta l U_4,\quad Y_2'=\beta l\{U_1+U_4+\xi_a(U_2-U_3)\}\\
&Y_3'=\beta l\left\{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}(U_2+U_3)+U_1+U_4+\frac{\alpha_3}{\alpha_2}(U_4-U_1)\right\}\\
&Y_4'=\beta l\left\{\frac{\beta_1}{\beta_2}(U_2+U_3)+U_1+U_4-\frac{\beta_3}{\beta_2}(U_2-U_3)\right\}
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots (\mathrm{A}\cdot 1)$$

$$\left.\begin{aligned}
&Y_1''=2(\beta l)^2(U_3-U_2),\quad Y_2''=2(\beta l)^2(U_3+\xi_a U_1)\\
&Y_3''=2(\beta l)^2\left\{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}U_4+U_3-\frac{\alpha_3}{\alpha_2}U_2\right\}\\
&Y_4''=2(\beta l)^2\left\{\frac{\beta_1}{\beta_2}U_4+U_3-\frac{\beta_3}{\beta_2}U_1\right\}
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots (\mathrm{A}\cdot 2)$$

$$\left.\begin{aligned}
&Y_1^{(3)}=-4(\beta l)^3U_1,\quad Y_2^{(3)}=2(\beta l)^3\{U_4-U_1\\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad +\xi_a(U_2+U_3)\}\\
&Y_3^{(3)}=2(\beta l)^3\left\{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}(U_3-U_2)+U_4-U_1\right.\\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad -\frac{\alpha_3}{\alpha_2}(U_1+U_4)\\
&Y_4^{(3)}=2(\beta l)^3\left\{\frac{\beta_1}{\beta_2}(U_3-U_2)+U_4-U_1\right.\\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad -\frac{\beta_3}{\beta_2}(U_2+U_3)
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots (\mathrm{A}\cdot 3)$$

② $\varDelta_i(X)$ の微係数

$$\left.\begin{aligned}
&\varDelta_i(X)'=\begin{vmatrix} Y_j & Y_k & Y_l\\ Y_j' & Y_k' & Y_l'\\ Y_j^{(3)} & Y_k^{(3)} & Y_l^{(3)}\end{vmatrix}\\
&\varDelta_i(X)''=\begin{vmatrix} Y_j & Y_k & Y_l\\ Y_j'' & Y_k'' & Y_l''\\ Y_j^{(3)} & Y_k^{(3)} & Y_l^{(3)}\end{vmatrix}\\
&\varDelta_i(X)^{(3)}=\begin{vmatrix} Y_j' & Y_k' & Y_l'\\ Y_j'' & Y_k'' & Y_l''\\ Y_j^{(3)} & Y_k^{(3)} & Y_l^{(3)}\end{vmatrix}
\end{aligned}\right\} (\mathrm{A}\cdot 4)$$

③ グリーン関数の求め方

いま，グリーン関数をその基本解を用いて，次のように表わす。

$$\left.\begin{aligned}
&\text{(i)}\quad 0\leqq X\leqq X_k : G_A(X, X_k)=C_1\cdot Y_1+C_2\cdot Y_2\\
&\text{(ii)}\quad X_k\leqq X\leqq 1 : G_B(X, X_k)=C_3\cdot Y_3+C_4\cdot Y_4
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots (\mathrm{A}\cdot 5)$$

このとき，$X=X_k$ において，$G_A=G_B$，$G_A'=G_B'$，

$G_A''=G_B''$ であり，$G_B-G_A=1$ が成り立つ。これらの関係は次のように表わされる。すなわち，$X=X_k$ において，

$$\left.\begin{aligned}
&C_1Y_1+C_2Y_2-C_3Y_3-C_4Y_4=0\\
&C_1Y_1'+C_2Y_2'-C_3Y_3'-C_4Y_4'=0\\
&C_1Y_1''+C_2Y_2''-C_3Y_3''-C_4Y_4''=0\\
&C_1Y_1^{(3)}+C_2Y_2^{(3)}-C_3Y_3^{(3)}-C_4Y_4^{(3)}=-1
\end{aligned}\right\}\quad(\mathrm{A}\cdot 6)$$

これは，$C_1\sim C_4$ に関する4元連立方程式であるから，容易に解ける。すなわち，本文式(41)及び式(A・4)を用いて，$C_i=\varDelta_i(X_k)$ $(i=1\sim 4)$ のように書ける。したがって，これを式(A・5)に代入することにより，本文の式(43)，(44)を得る。

④　Yの微係数

一般に，Yの微係数は，本文の式(45)より次のように表わされる。

$$Y^{(n)}=\frac{1}{\varDelta(0)}\{(Y_1(X)I_1(X))^{(n)}-(Y_2(X)I_2(X))^{(n)}+(Y_3(X)I_3(X))^{(n)}-(Y_4(X)I_4(X))^{(n)}\}$$
$$(n=1,\ 2,\ 3)\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{A}\cdot 7)$$

ただし，

$$\begin{aligned}
&\{Y_i(X)I_i(X)\}'=Y_i'(X)I_i(X)\\
&\quad-Y_i(X)\varDelta_i(X)F(X)\\
&\{Y_i(X)I_i(X)\}''=Y_i''(X)I_i(X)\\
&\quad-2Y_i'(X)\varDelta_i(X)F(X)\\
&\quad-Y_i(X)\{\varDelta_i'(X)F(X)+\varDelta_i(X)F'(X)\}\\
&\{Y_i(X)I_i(X)\}^{(3)}=Y_i^{(3)}(X)I_i(X)\\
&\quad-3Y_i''(X)\varDelta_i(X)F(X)\\
&\quad-3Y_i'(X)\{\varDelta_i'(X)F(X)+\varDelta_i(X)F'(X)\\
&\quad-Y_i(X)\{\varDelta_i''(X)F(X)+2\varDelta_i'(X)F'(X)\\
&\quad+\varDelta_i(X)F''(X)\}
\end{aligned}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{A}\cdot 8)$$

〔付録2〕

①　4節点3次A要素

$$\boldsymbol{I}_a=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{I}_b=\begin{pmatrix}0&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{I}_a=(1,\ 0,\ 0,\ 0)^T,\quad \boldsymbol{I}_b=(0,\ 1,\ 0,\ 0)^T$$

$$p=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}2&-5&2&0\\0&2&-5&2\\0&18&-9&0\\0&-9&18&0\end{pmatrix}\qquad p_x=\frac{1}{2l}\begin{pmatrix}-11&14&-2\\2&-14&11\\18&-54&9\\-9&54&-18\end{pmatrix}$$

$$p_{xx}=\frac{9}{(l)^2}\begin{pmatrix}2&-1\\-1&2\\-5&4\\4&-5\end{pmatrix}\qquad p_{xxx}=\frac{27}{(l)^3}\begin{pmatrix}-1\\1\\3\\-3\end{pmatrix}$$

$$\bar{p}=\frac{1}{1680}\begin{pmatrix}128&19&99&-36\\&128&-36&99\\&&648&-81\\\mathit{Sym}&&&648\end{pmatrix}$$

$$p^x=\frac{1}{120l^2}\begin{pmatrix}444&-39&-567&162\\&444&162&-567\\&&1296&-891\\\mathit{Sym}&&&1296\end{pmatrix}$$

$$p^{xx}=\frac{1}{2l^4}\begin{pmatrix}162&-81&-405&324\\&162&324&-405\\&&1134&-1053\\\mathit{Sym}&&&1134\end{pmatrix}$$

$$\phi=\frac{1}{240l}\begin{pmatrix}-120&-21&-171&72\\21&120&-72&171\\171&72&0&-243\\-72&-171&243&0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{p}=\frac{1}{8}(1,\ 1,\ 3,\ 3)^T$$

②　2節点3次B要素

$$\boldsymbol{I}_a=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{pmatrix}\qquad \boldsymbol{I}_b=\begin{pmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{I}_a=(1,\ 0,\ 0,\ 0)^T,\quad \boldsymbol{I}_b=(0,\ 0,\ 1,\ 0)^T$$

$$p=\begin{pmatrix}1&3&0&0\\0&l&0&0\\0&0&3&1\\0&0&-l&0\end{pmatrix}\qquad p_x=\frac{1}{l}\begin{pmatrix}0&-6&0\\l&-2l&0\\0&6&0\\0&-2l&l\end{pmatrix}$$

$$p_{xx}=\frac{2}{l^2}\begin{pmatrix}-3&3\\-2l&l\\3&-3\\-l&2l\end{pmatrix}\qquad p_{xxx}=\frac{6}{l^3}\begin{pmatrix}2\\l\\-2\\l\end{pmatrix}$$

$$\bar{p}=\frac{1}{420}\begin{pmatrix}156&22l&54&-13l\\&4l^2&13l&-3l^2\\&&156&-22l\\\mathit{Sym}&&&4l^2\end{pmatrix}$$

$$p^x=\frac{1}{30l^2}\begin{pmatrix}36&3l&-36&3l\\&4l^2&-3l&-l^2\\&&36&-3l\\\mathit{Sym}&&&4l^2\end{pmatrix}$$

$$p^{xx}=\frac{2}{l^4}\begin{pmatrix}6&3l&-6&3l\\&2l^2&-3l&l^2\\&&6&-3l\\\mathit{Sym}&&&2l^2\end{pmatrix}$$

$$\phi=\frac{1}{60}\begin{pmatrix}-30&-6l&-30&6l\\6l&0&-6l&l^2\\30&6l&30&-6l\\-6l&-l^2&6l&0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{p}=\frac{1}{12}(6,\ l,\ 6,\ -l)^T$$

③ 2節点5次C要素

$$I_a=\begin{pmatrix} 1&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0 \end{pmatrix} \quad I_b=\begin{pmatrix} 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&1&0&0\\ 0&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{I}_a=(1,\ 0,\ 0,\ 0,\ 0,\ 0),\quad \boldsymbol{I}_b=(0,\ 0,\ 0,\ 1,\ 0,\ 0)$$

$$p=\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 2&10&20&0&0&0\\ 0&2l&8l&0&0&0\\ 0&0&l^2&0&0&0\\ 0&0&0&20&10&2\\ 0&0&0&-8l&-2l&0\\ 0&0&0&l^2&0&0 \end{pmatrix}$$

$$p_x=\frac{1}{2l}\begin{pmatrix} 0&0&-60&0&0\\ 2l&8l&-24l&0&0\\ 0&2l^2&-3l^2&0&0\\ 0&0&60&0&0\\ 0&0&-24l&8l&2l\\ 0&0&3l^2&-2l^2&0 \end{pmatrix}$$

$$p_{xx}=\frac{1}{l^2}\begin{pmatrix} 0&-60&60&0\\ 0&-36l&24l&0\\ l^2&-6l^2&3l^2&0\\ 0&60&-60&0\\ 0&-24l&36l&0\\ 0&3l^2&-6l^2&l^2 \end{pmatrix}$$

$$p_{xxx}=\frac{3}{l^3}\begin{pmatrix} -20&80&-20\\ -12l&40l&-8l\\ -3l^2&6l^2&-l^2\\ 20&-80&20\\ -8l&40l&-12l\\ l^2&-6l^2&3l^2 \end{pmatrix}$$

$$p=\frac{1}{55440}\begin{pmatrix} 21720&3732l&281l^2&6000&-1812l&181l^2\\ &832l&69l^3&1812l&-532l^2&52l^3\\ &&6l^4&181l^2&-52l^3&5l^4\\ &&&21720&-3732l&281l^2\\ &&&&832l^2&-69l^3\\ &\text{Sym}&&&&6l^4 \end{pmatrix}$$

$$p=\frac{1}{1260l^2}\begin{pmatrix} 1800&270l&15l^2&-1800&270l&-5l^2\\ &288l^2&21l^3&-270l&-18l^2&6l^3\\ &&2l^4&-15l^2&-6l^3&2l^4\\ &&&1800&-270l&15l\\ &&&&288l^2&-210l^3\\ &\text{Sym}&&&&2l^4 \end{pmatrix}$$

$$p^{xx}=\frac{1}{70l^4}\begin{pmatrix} 1200&600l&30l^2&-1200&600l&-30l^2\\ &384l^2&22l^3&-600l&216l^2&-8l^3\\ &&6l^4&-30l^2&8l^3&l^4\\ &&&1200&-600l&30l^2\\ &&&&384l^2&-22l^3\\ &\text{Sym}&&&&6l^4 \end{pmatrix}$$

$$\phi=\frac{1}{5640l}\begin{pmatrix} -2520&-660l&-60l^2&-2520&660l&-60l^2\\ 660l&0&-5l^3&-660l&156l^2&-13l^3\\ 60l^2&5l^3&0&-60l^2&13l^3&-l^4\\ 2520&660l&60l^2&2520&-660l&60l^2\\ -660l&-156l^2&-13l^3&660l&0&-5l^3\\ 60l^2&13l^3&l^4&-60l^2&5l^3&0 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{p}=\frac{1}{120}(60,\ 12l,\ l^2,\ 60,\ -12l,\ l^2)^T$$

A Study on the Analytical Procedure of Steel Beam under the Breakwater

By

Seiki OHMAKI and Yukio TSUBOTA

Summary

In the case of constructing facilities for fishing ports such as breakwaters on the soft ground, steel beams are sometimes installed in the rubble-mound as armature. This paper is concerned with the analysis of the behaviour of such steel beams in the rubble-mound. Analysis was carried out by two methods, that is, analytical one using Green's function and numerical one using the finite element method. Some calculated results by these methods were given for some typical load and boundary conditions. The accuracy of the present methods was examined.

From this study, the validity of the analytical solution by Green's function was assured. It was also made clear that the finite element formulation by the 2 nodes-3rd ordered element model and 2 nodes-5th ordered element model gave adequate results for analysis of steel beams under such conditions as described above.

水工研報告 6
1985 pp. 179～203

高採算性沿岸漁船の基本設計用シミュレーションプログラムについて

土屋　孟*・鈴木　四郎**

目　次

1.　まえがき……179
2.　基本構想……180
3.　インプット様式……180
4.　アウトプット様式……182
5.　主業に関する最適新船計画……186
　5.1　類似現存船資料の利用……186
　5.2　計画母船型の算出……186
　5.3　計画船の往復航海状態の算出……188
　5.4　船の復原力の検討……188
　5.5　船のＫＧの推定……189
　5.6　変型シリーズ船型の算出……189
　5.7　最適船型とその最適操業計画の選定……189
　5.8　異る船型の利用対策……189
　5.9　漁業採算性の計算内容……190
6.　副業に関する計算の概要……190
7.　最適設計船の選定……190
8.　計算例……191
　8.1　対象漁船の要目等……191
　8.2　アウトプットの例示……191
　8.3　計算結果の考察……193
9.　使用上の注意……196
　謝　辞……201
　参考文献……201
　Summary……203

1.　まえがき

漁船の工学技術研究の目的は，船及び乗員の安全を確保する許容限界内において，経営上最も有利な漁船の設計を行い，その操業運航計画を見出すことにあると考えられる。

しかし，社会・経済環境，漁業資源環境，および行政環境等の多数の要因が漁業経営に大きく影響するため，現実にはとかく工学技術研究の成果が漁業経営の合理化に十分に生かされずに今日に至っているものが少くないように思われる。

幸にして，電算機の処理能力がここ10数年来飛躍的に増大してきたので，現在の技術研究レベルで知られている沿岸漁船の設計と操業運航計画選定に関する技術的手法を電算用シミュレーションプログラムの中に内蔵させ，多くの技術研究成果を経営合理化漁船の設計要目と操業運航計画の作成時に活用させることが，ある程度まで可能となってきた。

本研究では，水産庁の特別研究「沿岸漁船の操業効率の向上のための最適システム化[30]」の一環として，従来あまり検討されていなかった3～15トンクラスの比較的軽装備のわが国の沿岸漁船に焦点をあて，上述の考え方を推進するために造船工学を主体とする電算用シミュレーションプログラムの作成を試みた。

このプログラムは葉室親正博士が昭和40年代当初から提唱し各種漁船について試算を行った採算性に関する算式[5)~27)]（以下葉室の式と呼ぶ）及び理論体系を参考にして作成した。また，このプログラムはその手法を導入して，できるだけ多くの沿岸漁船に利用できるように，年間の操業運航計画，航海速力の推定，復原力の確保，漁獲物の保蔵法等に関する造船技術上の新しい構想を盛り込むこととした。

また，わが国の沿岸小型漁船は，FRP製となったことを契機に著しく軽量高速化したため，その船型改良を目的とした系統的模型試験がFRP漁船研究会第6研究分科会の協力の下で，（財）日本小型船舶工業会，および（財）日本造船技術センターにおいて実施され，有効馬力推定式が作成公表されている[1)2)]ので，本プログラムではそれを半滑走型（いわゆる角型）の沿岸漁船の速

---

*　所長，元漁船工学部
**　漁船工学部

力推定に利用している。

沿岸漁船の年間の操業内容は多角的で，この種のプログラムの開発対象としては困難な漁船であるが，あえてその開発を試みたのは，今後のわが国の水産業の発展の主力は沿岸漁船漁業と見られ，かつそれらの発展に必要なハード技術の研究効率を高めるには，それらを漁業経営の合理化に結びつけるソフト技術開発を併行して実施することが重要と考えられたからである。

なお，採算性に関する菓室の式及び理論体系を参考にして開発した「沿岸漁船の最適操業計画検討用シミュレーションプログラムについて」と題する前年度の報告[28)]のプログラムは，本プログラム中の現存船の部分に当り，既に一体化されているので，今後は本プログラムで計画船と現存船の何れの場合も計算可能である。

また，本プログラムにおいては，内部説明にもあるとおり，漁獲手段の詳細技術には立ち入らずに，単位漁獲努力当りの平均漁獲量をインプットにより指定する方式を採っているので，本報告中の「操業計画」の内容は，正確には操業のための漁船の運航計画を意味するものである。

本プログラムにより若干の計算を試み，沿岸漁船漁業の経営改善に関して予期どおりの興味ある結果が多少得られたので，同プログラムの内容をご理解いただくことも兼ねて，それらの要約を報告することとした。

2.　基本構想

本プログラムは，作成の目的に沿って，以下の基本的構想にもとづき作成された。

① わが国の沿岸漁船の基本設計計画を作る際に，できるだけ巾広く活用できる凡用プログラムとする。

② 沿岸漁業をとりまく社会・経済環境，および漁業環境等を，類似の現存船を参考として任意に設定し，その条件下において，経営上最も有利な最適漁船の基本設計計画と最適操業計画を求め得るものとする。ただし，本プログラムでいう最適とは，プログラムの中で求める一連の系統的候補船型（5.6 参照）または系統的操業計画（5.3 参照）の計算結果の中で利益額または利益率が最も高いものを意味する。

③ 既成の沿岸漁船の最適操業計画シミュレーションプログラム[28)]は現存船に対するものであるが，本プログラムは新船計画用であるため，省エネルギー漁船船型の開発[1)2)4)]，漁船の復原性能の確保[3)]等を含む既存の造船工学上の研究成果をできるだけ有効に活用するものとする。

④ 沿岸漁船の操業の実態にもとづき，年間3種類までの漁業に従事する漁船に適用できるものとする。

その際，年間利益額が最も高いと予想される漁業種類を主業と見なして，それに焦点をあてた最適漁船を計画し，他の副業種類については，同計画船を用いた最適操業計画を求め得るものとする。

各漁業の収支計算はそれらの漁期毎に行い，年間の合計収支はそれらを代数和することによって求めるものとする。

⑤ 全体構想をバランスよくまとめることを主眼にしてプログラムの開発を進め，個々の造船技術面の計算精度向上については，その構想の下で必要に応じて順次補足充実させうるものとする。

⑥ 最近の沿岸漁船の使用実態に鑑み，省エネルギーの観点から，漁船の航海速度と一回当りの操業日数（以下単位操業日数と称する）の漁業経営面への影響を把握し易いものとする。

⑦ 一回操業当りの漁獲量と魚の水揚げ単価は，漁業経営に最も大きく影響する要素であるが，それらを推定する一般的方法を見出すことは現在の段階では非常に困難なため，本プログラムでは，類似現存船の操業の実績をもとにして，計算者がインプットにより指定することとする。

その際，単位操業日数の増加に伴って予想される魚価の低減の影響を盛り込むことのできるプログラムとする。

⑧ 計算で求められる最適漁船の推定年間収支が，類似の現存船のそれと比べてどの程度改善されるかを容易に比較できるものとする。

⑨ 漁業経営の合理化を追求する際に，とかく安全性が軽視されがちであるので，その歯止めのため，最適設計船の最適操業計画における横メタセンターGM，安全性示数C_1，および中央乾舷が，それぞれ指定される安全基準を満足するものとなるよう対策を講ずることとする。

以上の諸点を考慮した本プログラムの計算の概要流れ図を図1に示す。図1に関する重要説明事項を表1に掲げる。

3.　インプット様式

本プログラムのインプット表の様式を表2に示す。同表は3段1組で1枚のインプットカードの説明をしているが，各組の最上段は説明用語，2段目は説明用記号，3段目はその単位を示す。同表の①〜⑰はインプットのカードナンバーを示し，夫々以下に示す諸数値等の記入欄となっている。

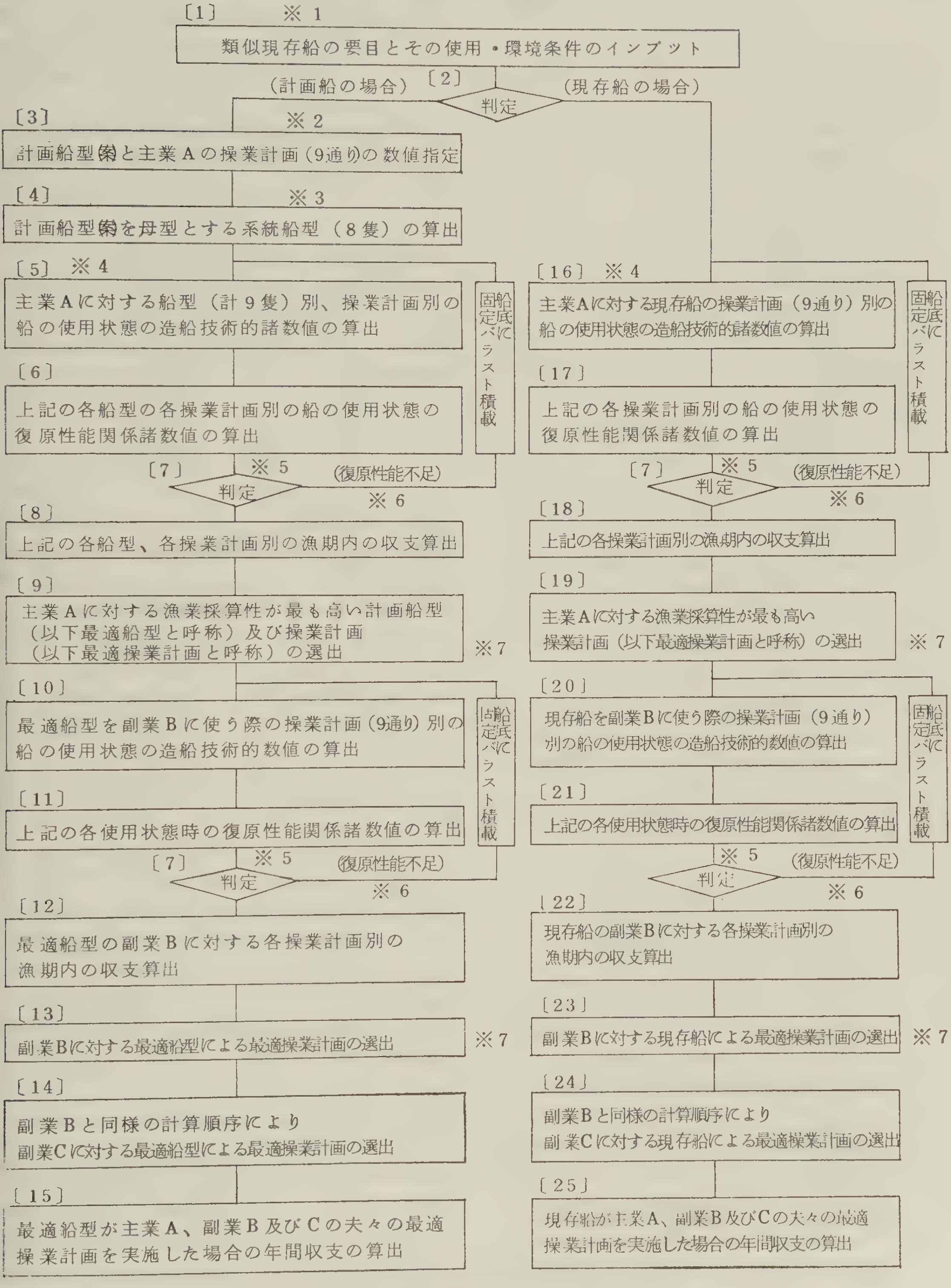

〔1〕 ※1
類似現存船の要目とその使用・環境条件のインプット
〔2〕
（計画船の場合）
判定
（現存船の場合）
〔3〕 ※2
計画船型(案)と主業Aの操業計画（9通り）の数値指定
〔4〕 ※3
計画船型(案)を母型とする系統船型（8隻）の算出
〔5〕 ※4
主業Aに対する船型（計9隻）別、操業計画別の船の使用状態の造船技術的諸数値の算出
固定船底にバラスト積載
〔6〕
上記の各船型の各操業計画別の船の使用状態の復原性能関係諸数値の算出
〔7〕 ※5
判定
（復原性能不足）
※6
〔8〕
上記の各船型、各操業計画別の漁期内の収支算出
〔9〕
主業Aに対する漁業採算性が最も高い計画船型（以下最適船型と呼称）及び操業計画（以下最適操業計画と呼称）の選出
※7
〔10〕
最適船型を副業Bに使う際の操業計画（9通り）別の船の使用状態の造船技術的数値の算出
固定船底にバラスト積載
〔11〕
上記の各使用状態時の復原性能関係諸数値の算出
〔7〕 ※5
判定
（復原性能不足）
※6
〔12〕
最適船型の副業Bに対する各操業計画別の漁期内の収支算出
〔13〕
副業Bに対する最適船型による最適操業計画の選出
※7
〔14〕
副業Bと同様の計算順序により副業Cに対する最適船型による最適操業計画の選出
〔15〕
最適船型が主業A、副業B及びCの夫々の最適操業計画を実施した場合の年間収支の算出
〔16〕 ※4
主業Aに対する現存船の操業計画（9通り）別の船の使用状態の造船技術的諸数値の算出
固定船底にバラスト積載
〔17〕
上記の各操業計画別の船の使用状態の復原性能関係諸数値の算出
〔7〕 ※5
判定
（復原性能不足）
※6
〔18〕
上記の各操業計画別の漁期内の収支算出
〔19〕
主業Aに対する漁業採算性が最も高い操業計画（以下最適操業計画と呼称）の選出
※7
〔20〕
現存船を副業Bに使う際の操業計画（9通り）別の船の使用状態の造船技術的数値の算出
固定船底にバラスト積載
〔21〕
上記の各使用状態時の復原性能関係諸数値の算出
※5
判定
（復原性能不足）
※6
〔22〕
現存船の副業Bに対する各操業計画別の漁期内の収支算出
〔23〕
副業Bに対する現存船による最適操業計画の選出
※7
〔24〕
副業Bと同様の計算順序により副業Cに対する現存船による最適操業計画の選出
〔25〕
現存船が主業A、副業B及びCの夫々の最適操業計画を実施した場合の年間収支の算出

図 1 計算概要流れ図

Flow Chart of the Program

表１　図1の説明

Explanation of Fig. 1

記号	説　　明
*1	現存船には計画船にできるだけ類似した船規模，船型を持ち，類似の操業計画を持つ船を選ぶ。
*2	操業計画（複数）の指定内容は，単位操業日数（3個）と航海時および漁撈時の主機関負荷率（3個）の組合わせの9計画となる。
*3	系統船型（8隻）の内容は，母船型に対し，L/B，B/D，C_B（または C_P），lcb の各船型要素を正負数パーセント各単独に変化させた船型とする。5.6参照。
*4	年間で最も利益額の大きい漁業種類を主業Aとし，他は副業BおよびCとする。
*5	復原性能の良否の判定には，GM，C_1 係数，および乾舷の各最小限界値を基準とする。
*6	GM 値不足の場合は，船底に軽荷排水量の 2.5 パーセントの重量の固定バラストを積載して，GM 基準を満足させるまで計算を繰り返す。 ただし，それを10回繰り返しても GM 基準を満足しない場合は計算を打ち切る。
*7	最適操業計画の選出は，漁期間内の利益額または利益率が最高値となるものを対象とする。ただし，船の復原性能と乾舷が基準値を下廻る操業計画は，選出対象から除外される。従って，選出された最適操業計画では船の安全性が損なわれることはない。

①　　：計画船または現存船に関する基本条件の指定

②～⑦：現存船の要目，環境条件等の記入

⑧　　：計画船用のインプット指定カードで，②～⑦に記入された現存船の要目等の一部を，⑧に記入の指定値どおりに変えることができる。①のカードの2番目の指定値が1の場合，すなわち現存船の操業計画計算のみを指定する場合には，このカードは不必要

⑨～⑮：現存船の使用実態にもとづく操業計画等の記入

⑯．⑰：計画船用のインプット指定カードで，⑨～⑮に記入された現存船の操業計画等の一部を⑯，⑰に記入の指定値どおりに変えることができる。⑧と同様，①のカードの2番目の指定値が1の場合，すなわち現存船の操業計画計算のみを指定する場合には，このカードは不必要。

⑨～⑰：①のカードの4番目の指定値が2または3の場合，すなわち年間の漁業種類が2または3の場合には，⑨～⑰のカードを2または3組揃える必要がある。

インプット表中の用語の補足説明を表3に掲げる28)。

インプット表中，太い実線で囲まれた部分は漁業関係者の記入する部分，その他は造船技術者が主に記入する部分となっている。後者の現存船部分については，きちんとした設計にもとづいて建造された漁船であって，その関係資料が整ってさえいれば，造船技術者が比較的容易に記入できる内容となっている。計画船に関するインプット（カード No.⑧．⑯．⑰），については，漁業者と造船技術者とがよく相談をしてきめるべき内容であろう。

4.　アウトプット様式

アウトプット表にはa，b，cおよびdの4つの様式がある。様式aは表7.1に例示のとおり，計画船または現存船の要目，使用・環境条件等のインプットがそのままの様式でアウトプットされる表である。様式bは，表7.2に例示のとおり，一連の系統的候補船型（5.6参照）のそれぞれに対してその要目・使用環境条件等が各1頁にアウトプットされる。それらの内容は概ねインプットした諸数値等をそのまま打ち出したものであるが，一部は船型等の変化に伴って計算で求めた数値が打ち出される。

様式cは各計画船型または現存船の操業計画別の計算結果のアウトプット表で，船型ごとに表4の様式で打ち出される。そのうち，上部の6行は説明記号を示し，7行以下に同一様式で操業計画別の計算結果が説明無しで数値のみが1頁内に合計9組打ち出される。9組の内訳けは，主機関馬力（現存船の場合は主機の負荷率）3通りと，単位操業日数3通りの組み合わせとなる。表4の操業計画①～⑨までのアウトプットの諸数値の単位は，同表中の操業計画①の欄を借りて表示した。また同表中の記号の説明を表5に示す。この様式の算出例を表8および9に示す。

様式dの説明表の掲示は省略するが，表10および表11の例示のとおり，計算結果の一部の要約打ち出しの内容となっている。すなわち，表4の様式で打ち出された全計算結果の中から，主業Aの利益額または利益率（表2のインプット表中の①行の経済指標の指定によりその何れかに決まる）の最も高い計画船型とそれに伴う操業計画の計算結果と，それに続いて同計画船型の副業BおよびCがあれば各利益額または利益率の最も高い操業計画

表 2 インプット表の様式

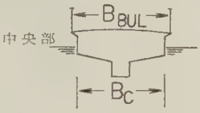
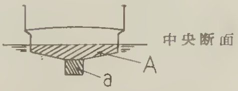
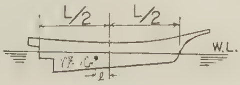
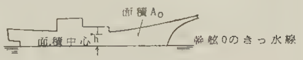
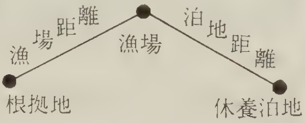
In-Put Format

	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	80
①	タイトル名，14桁(A)		新船か現存(I)	経済指標(I)	漁業種類数(I)	主漁業名称—A (A)		副漁業名称—B (A)		副漁業名称—C (A)		船型要素(I)
			0：新船	0：利益率	≦3							0：変化
			1：現存船	1：利益額								1：固定
②	総トン数(R)	水線長(R)	型幅(R)	ブルワーク間隔 (R)	チャイン幅 (R)	型深さ(R)	ブルワーク高さ (R)	試運転速力(R)	同排水量(R)	同主機負荷率 (R)		
	GT	L	B	B_{BUL}	B_C	D	H_{BUL}	V_{TO}	Δ_{TO}	δ_{MT}		
	トン	m	m	m	m	m	m	ノット	t			
③	主機関馬力(R)	補機関馬力(R)	燃油倉容積(R)	清水倉容積(R)	鋼船か(I)	FRP 船か(I)	木船か(I)	附加物排水量 (R)	角型キールの断面積比(R)	現存船船型(I)		
	SHP_{MO}	SHP_{AO}	FOT_{cap}	FWT_{cap}	1：鋼船	1：FRP 船	1：木船	Δ_{AP}	a/A	0：角型		
	馬力	馬力	m^3	m^3				t		1：丸型		
④	計画満載排水量(R)	〃 中央型きっ水(R)	〃 浮心前後位置(R)	〃 推進係数 (R)	〃 浮心高さ (R)	〃 メタセンター高さ(R)	〃 横環動半径 (R)	〃 水線面積係数(R)	〃 中央断面係数(R)			
	Δ_{FO}	T_{FO}	lcb_{FO}	PC_{FO}	KB_{FO}	BM_{FO}	K/B_{FO}	C_{WFO}	C_{MFO}			
	t	m	%		m	m						
⑤	軽荷排水量(R)	〃 中央型きっ水(R)	〃 浮心前後位置(R)	〃 推進係数 (R)	〃 浮心高さ (R)	〃 メタセンター高さ(R)	〃 横環動半径 (R)	〃 水線面積係数(R)	〃 中央断面係数(R)			
	Δ_{LO}	T_{LO}	lcb_{LO}	PC_{LO}	KB_{LO}	BM_{LO}	K/B_{LO}	C_{WLO}	C_{MLO}			
	t	m	%		m	m						
⑥	風圧面積比(R)	A_0のレバー比 (R)	清水消費量(R)	食糧消費量(R)								
	$A_0/L \cdot B$	h_0/D	w_{FW}	w_{FOOD}								
			kg/人・日	kg/人・日								
⑦	船価(R)	現在の船令(R)	耐用年数(R)	残存価格(R)	自己資本率(R)	借入金利率(R)	氷価格(R)	燃油価格(R)				
	万円	年	年	万円	%	%	万円/t	万円/kℓ				
⑧	計画船相乗積指定(R)	〃 主機関馬力 (R)	〃 補機関馬力 (R)	C_Pの増減指定 (R)	満載時 PC_{FP}(R)	軽荷時 PC_{LP}(R)	特装品価格(R)	耐用年数(R)	計画 L/B (R)	計画 B/D (R)	船型指定(I)	船質指定(I)
	$PLBD$	SHP_{MP}	SHP_{AP}	ΔC_P					L/B_P	B/D_P	0：角型	1：鋼 2：FRP
	m^3	馬力	馬力	%			万円	年			1：丸型	3：木

説明 (A) は英文，〔I〕は整数，(R) は実数（小数点のある数字）で記入する。

⑨	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77
	漁期開始日（I）	漁期終了日（I）	準備日数（R）	ドック日数（R）	漁場距離（R）	泊地距離（R）	探魚時間率（R）	仕込・水揚時間（R）	休養時間（R）	単位操業時間（R）	
	N_{STA}	N_{FIN}	T_{PRE}	T_{COCK}	D_A	D_B	α_T	T_{LAND}	T_{REST}	T_{FCY}	
			日	日	浬	浬	%	時間/出漁回	時間/日	時間/1回操業	
⑩	単位操業日数−1（R）	〃−2（R）	〃−3（R）	泊地休養回数−1（R）	〃−2（R）	〃−3（R）	漁獲量活魚（R）	〃保蔵魚（R）	氷使用重量（R）	函使用重量（R）	えさ使用重量（R）
	T_{VCY1}	T_{VCY2}	T_{VCY3}	n_{R1}	n_{R2}	n_{R3}	W_{CATL}	W_{CATC}	W_{ICE}	W_{CASE}	W_{BAIT}
	日/回	日/回	日/回	回/回	回/回	回/回	kg/1回操業	kg/1回操業	kg/日	kg/日	kg/日
⑪	いけす容積（R）	いけす海水重量/〃容積（R）	活魚重量/いけす海水重量（R）	保蔵倉容積（R）	保蔵そう内重量/〃容積（R）	保蔵魚重量/保蔵そう内重量（R）	漁具重量（R）	特装品重量（R）			
							W_{FG}	W_{SP}			
	m³	t/m³	t/t	m³	t/m³	t/t	t	t			
⑫	主機負荷率（往）-1（R）	〃（復）-1（R）	〃（漁）-1（R）	〃（往）-2（R）	〃（復）-2（R）	〃（漁）-2（R）	〃（往）-3（R）	〃（復）-3（R）	〃（漁）-3（R）		
	δ_{M1-1}	δ_{M1-2}	δ_{M1-3}	δ_{M2-1}	δ_{M2-2}	δ_{M2-3}	δ_{M3-1}	δ_{M3-2}	δ_{M3-3}		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
⑬	補機負荷率（往）（R）	〃（復）（R）	〃（漁）（R）								
	δ_{A1}	δ_{A2}	δ_{A3}								
	%	%	%								
⑭	KG/D(往)	KG/D(復)	限界風速（R）	GM基準値（R）	ロール減滅係数（R）	休漁日率（R）	荒天漂泊率（R）	基準乾舷修正値（R）			
	KG/D_1（R）	KG/D_2（R）	U	GM_R	N_{20}	α_K	α_D	δF			
			m/s	m	1/度	%	%	m			
⑮	魚価，活魚（R）	〃保蔵魚（R）	人件費（R）	乗員数（I）	雑費/漁期（R）	歩合率/漁期（R）	漁具費/漁期（R）	えさ代/操業日（R）	泊地寄港費（R）	ドック費/漁期（R）	魚価低減率/日（R）
											β_O
	万円/kg	万円/kg	万円/人・月	人	万円/漁期	%	万円	万円/日	万円/回	万円	%
⑯	計画船魚価活魚（R）	〃保蔵魚（R）	〃人件費（R）	〃乗員数（I）	〃KG/D（往）	〃KG/D（復）	〃限界風速（R）	〃N_{20}（R）	〃休漁日率（R）	〃荒天漂泊率（R）	〃魚価低減率/日（R）
					KG/D_{1P}（R）	KG/D_{2P}（R）	U_P	N_{20P}	α_{KP}	α_{DP}	β_P
	万円/kg	万円/kg	万円/人・月	人			m/s	1/度	%	%	%
⑰	計画船漁具重量（R）	特装品重量（R）	ドック費/漁期（R）								
	W_{FGP}	W_{SPP}									
	t	t	万円								

表 3　インプット表の説明[28)]
Explanation of In-Put Format

カード番号	用語名	説明
①	（A）	英字で記入する。
	（I）	整数で記入する。
	現存か新船	0または1の指定により，図1の〔2〕が判定される。0とすれば計画船，1とすれば現存船の計算が行われる。
	経済指標	0とすれば利益率，1とすれば利益額の最高のものが図1の*7の処で選出される。
②	（R）	実数で記入する。小数点を入れる。
	ブルワーク間隔	B_{BUL} 
	チャイン幅	B_C
③	主機関馬力 補機関馬力	連続最大出力とする。
	付加物排水量	ここでは角型キールの排水量
	BOX KELL の a/A	a，Aは次図の意。Aはaを含む。きっ水Tはa部分を含まず。
	現存船船型指定	現存船の速力推定を行う際に，角型用か丸型用かどちらの馬力推定式を使うかを指定する。 前者は文献1)と2)，後者は文献3)の式を使う。
④	計画満載	それ以上の積載は考えられない最大値を指す。
⑤	*lcb*	 $lcb=\frac{l}{L}\times100(\%)$，船尾側は負。
	PC	主機関の *EHP*/*SHP* の推定値
⑥	A_0	中央乾舷0の時の風圧側面積（m²）
	h_0	A_0 の水線上の面積モーメントレバー（m）
	特装重量	一般的軽荷排水量推定時に含まれない特殊装備の重量合計
⑦	船令	現在の船令
	耐用年数	建造後使用可能な船令
⑧	相乗積指定	計画船の *L*×*B*×*D* の値の指定
⑨	漁期開始日 終了日	1月1日：1 12月31日：365 翌年の1月30日：395で表す。
	漁場距離 泊地距離	浬
	探魚時間率	全漁場滞在時間中の探魚の時間の比。
⑩	出漁日数 －1，2，3	単位出漁日数3通りの指定
	泊地休養回数 －1，2，3	上記の出漁日数に対応する泊地休養回数
⑪	活魚／いけす海水	活魚として積める最大限界値を記入する。（重量比）
	保蔵魚／そう内全重量	魚そう内積載全重量に対する純漁獲物重量の比
⑫	主機関負荷率（往） －1，2，3	往航時の3通りの主機関負荷率の指定。（計画船の時は主機関馬力算出用に用いられる。）
	主機関負荷率（往）（復）（漁）	往航，復航，または操業時の主機関負荷率を示す。（同上）
⑬	補機関負荷率（往）（復）（漁）	往航，復航，または操業時の補機関負荷率の指定。（現存船，計画船共用）
⑭	*KG*/*D* （往）（復）	往航時，または復航時の *KG*/*D* の値
	限界風速	*C* 係数の計算時に使用する。
	GM 基準値	船の復原性上必要な *GM* の最小限値で，原則として漁船の性能基準に準じて指定する。
	N_{20}	20度のローリング時の減滅係数。
	休漁日率	（休漁日数）／（全出漁予定日数）の百分率。
	荒天漂泊率	1日の操業時間中，荒天等のため操業できない時間の比率

	基準乾舷修正値	本プログラムでは基準乾舷値Fは $F=\frac{D}{15}+0.20$（m）として組み込まれているので，それに対して修正が必要な際の修正値
⑮	魚価低減率／日	単位出漁日数の1日延長当りの魚価低減率。p. 84の（14）式参照

の計算結果が，表4と同様の様式で打ち出される。

また，それら，A，BおよびCの各漁業期間内の経費計，水揚金額計，および利益額計の合計，すなわち年間の経費，水揚および利益額の各合計が最下行に一行で打ち出され，他船との総合比較がし易い様式となっている。（表4末尾参照）

なお，計画船の計算の際には，表10（年間1漁業種類の操業の場合）または表11（年間3漁業種類の操業の場合）の例示に見られるように，計画船に関する打ち出しに先立って，同一の様式で当初選定した類似現存船が主業Aを操業する場合の利益額または利益率が最も高くなる操業計画時の計算結果が先づ参考資料として打ち出され，その直後に打ち出される計画船の主業時の計算結果との比較を容易にしている。

5.　主業に関する最適新船計画

5.1　類似現存船資料の利用

本計算プログラムでは，類似現存船の稼動の現状を基本的参考資料として新船計画を進めるため，現存船に関してできるだけ詳細な情報をインプットする必要がある。そのため，参考文献[28)]のインプット表をそのまま利用し，表2の②～⑦に現存船の要目と環境条件等，⑨～⑮にその操業実態をインプットすることとした。

5.2　計画母船型の算出

計画母船型は，表2の⑧行目にインプットされている指定の諸要目と，同表中の現存船に関する諸数値を使って，以下の諸式で算出する。記号の説明は以下特記のほかは表2（インプット表）に記載されている。

$$L_P = L\times\left(\frac{PLBD}{LBD}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad \cdots\cdots(1)$$

$$B_P=\left\{B\times D\times\left(\frac{PLBD}{LBD}\right)^{\frac{1}{3}}\times\left(\frac{B}{D_P}\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad \cdots\cdots(2)$$

$$D_P=B_P/(B/D_P) \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$C_{PFP}=C_{PFO}+\delta C_P \qquad \cdots\cdots(4)$$

ただし $C_{PFO}=\dfrac{\Delta_{FO}-\Delta_{AP}}{L\times B\times T_{FO}\times C_{MFO}\times 1.025}$

C_{PFP}：計画船の満載状態の C_P

C_{PFO}：現存船の満載状態の C_P

$$C_{BFP}=C_{PFP}\times C_{MLP} \qquad \cdots\cdots(5)$$

ただし $C_{MLP}=C_{MLO}$ と仮定する。

C_{MLP}：計画船の軽荷状態の C_M

C_{MLO}：現存船の軽荷状態の C_M

以下同様

$$\Delta_{FP}=\Delta_{FO}\times\left(\frac{PLBD}{LBD}\right) \qquad \cdots\cdots(6)$$

$$T_{FP}=\frac{\Delta_{FP}-\Delta_{AP}\times\dfrac{PLBD}{LBD}}{L_P\times B_P\times C_{BFP}\times 1.025} \qquad \cdots\cdots(7)$$

$lcb_{FP}=lcb_{FO}$　と仮定する

PC_{FP}：⑧行中の指定値による。

$$KB_{FP} = KB_{FO}\times\frac{T_{FP}}{T_{FO}} \qquad \cdots\cdots(8)$$

$$BM_{FP}=BM_{FO}\times\left(\frac{B_P}{B}\right)^2\times\left(\frac{T_{FO}\times C_{BFO}}{T_{FP}\times C_{BFP}}\right) \qquad \cdots\cdots(9)$$

$$\left.\begin{array}{l} K/B_{FP}=K/B_{FO} \\ C_{WFP}\ =C_{WFO} \\ C_{MFP}\ =C_{MFO} \end{array}\right\}\text{と仮定する。}$$

以上は計画満載状態に関する諸数値算出式であるが，軽荷状態における対応諸数値については，(10)，(11)式以外は満載状態の式と同様の式で求める。(10)式は多数の FRP 製実働漁船の実態調査資料から求めた推定式であるが，漁船の種類や地方の実情によっては，表2（インプット表）の⑰行中の特装品重量 W_{SPP} のインプットの数値で調整できるようにしている。

$$\Delta_{LP}=K_1\times PLBD+K_2\times SHF_{MP}+W_{SPP} \qquad \cdots(10)$$

ただし　角型船型の場合 $\begin{cases} K_1=0.180 \\ K_2=0.0066 \end{cases}$

丸型船型＊の場合（＊5.8参照） $\begin{cases} K_1=0.279 \\ K_2=0.0066 \end{cases}$

$$T_{LP}=\frac{\Delta_{LP}-\Delta_{AP}\times\left(\dfrac{PLBD}{LBD}\right)}{L_P\times B_P\times C_{BLP}\times 1.025} \qquad \cdots\cdots(11)$$

ただし　$C_{BLP}=C_{PLP}\times C_{MLP}$

$\fallingdotseq C_{PLP}\times C_{MLO}$（仮定）

$C_{PLP}=C_{PLO}+\delta C_P$

$C_{PLO}=\dfrac{\Delta_{LO}-\Delta_{AP}}{L\times B\times T_{LO}\times C_{MLO}\times 1.025}$

表 4　アウトプット表の様式C

Out-Put Format C

説明用記号	DISP.1	T.1	L/V.1	B/T.1	CB.1	CP.1	LCB.1	AE.1	AR.1	ABS.1	（船の往復航時の排水量，きつ水および船型要素）						
	DISP.2	T.2	L/V.2	B/T.2	CB.2	CP.2	LCB.2	AE.2	AR.2	ABS.2							
	（往航）	V.1	SHPM.1	SHPA.1	BAL.1	GM.1	C1.1	PC.1	燃油使用量	清水使用量	漁具積載量	（単位出漁時）	SHPM.F	（装備馬力）	STAB.1	乾舷 1	（安全性判定用）
	（復航）	V.2	SHPM.2	SHPA.2	BAL.2	GM.2	C1.2	PC.2	活魚積載量	保蔵魚積載量			SHPA.F		STAB.2	乾舷 2	
		（総合打出）	出漁日／回	出漁回数	出漁日計	出漁日率	操業回計	沖泊計	寄港回計	活魚計	保蔵魚計	漁獲合計			（操業関係）		
			船価	燃費計	人件費計			経費計		活魚売上計	保蔵魚〃	水揚計	漁期利益額計	漁期利益率	（収支関係）		
操業計画①	t	m					%	度	度	度							
	t	m					%	度	度	度							
		ノット	馬力	馬力	t	m			t	t	t		馬力			m	
		ノット	馬力	馬力	t	m			t	t			馬力			m	
			日/回	回	日		回	回	回	t	t	t					
			万円	万円	万円			万円		万円	万円	万円	万円				
～																	
操業計画⑨																	

（説明）　様式dに限り，下記の1行が追加される。

年間経費合計（万円）	年間水揚高合計（万円）	年間利益額合計（万円）

表 5　表4の記号の説明
Explanation of Out-Put Format C

記　号	単位	説　　明
DISP 1	t	排水量，1は往航時，2は復航時を示す。（以下同様）
〃 2	t	
T	m	中央型きっ水4)
L/∇		長さ排水容積比 $L/\nabla^{\frac{1}{3}}$
CB		C_B
LCB	%	lcb4)
AE	度	船首きっ水線入射角の1/2で通常 $1/2\,\alpha_e$ で示す4)。
AR	度	船尾の水線のしぼりの程度を表わす数値で通常 $1/2\,\alpha_r$ で示す4)。
ABS	度	B/4のバトックラインのきっ水線に対する最大傾斜角（船尾端部を除く）。通常 α_{BS} で示す4)。
V	ノット	航海速度
SHPM	馬力	主機関出力
SHPA	馬力	補機関出力
BAL	t	船底に積む固定バラストの重量
GM	m	船のメタセンター高さ
C_1		船の安全性示数 C_1 の値3)
燃油積載量 清水　〃 漁具　〃 活魚　〃 冷蔵魚〃	t	単位出漁時の各積載重量
SHPM.F SHPA.F	馬力	主機関，または補機関の連続最大出力
STAB		復原性能の良否判定記号 YES：計算 GM ≧ 基準 GM, $C_1 \geqq 1.0$ NO：　〃　<　〃，〃 < 〃
乾　舷	m	（中央乾舷の計算値）−（基準乾舷値）

5.3 計画船の往復航海状態の算出

計画母船型に関する要目等の諸数値が5.2で求められたら，次にインプットされた操業計画にもとづいて，出漁航海中の時間スケジュールを算出する順序となるが，葉室博士の採算性の理論体系に盛込まれている方法を参考にして開発した文献28)と同一のものとしている。

それにひき続いて計画母船型の軽荷排水量 $\varDelta_{LP}$ と表2の⑨～⑰にインプットされている類似現存船並びに計画船の操業計画関係諸数値を使って，計画母船型の往復各航海状態時の船の重量重心計算を行うことになるが，その方法も参考文献28)と同様の方法を用いたので，ここでは説明を省略する。

以上の諸計算により，計画母船型の往復航海時の使用状態の概要が求められるが，その計算過程で主機関の出力と船型，および航海速力の3者の間に強い関数関係があるため，その部分の収れん計算を行うことによって，それらの推定精度を実用に支障のない程度に高めることとした。その方法についても文献28)に述べられているので，ここでは説明を省略する。

計画船に装備する主機関馬力（ここでは連続定格馬力をいう）としては，表2—⑫にインプットされている現存船の往復航海時の負荷率3通りを利用して，馬力の異る3つの主機関を次式により求め，夫々が主機関として装備された場合の計画船の往復航海速度を始めとする諸状態を計算するプログラムとしている。

（表2—⑧にインプットされる計画船の主機関馬力）
×（往路航海時の負荷率）$_{1,\ 2,\ 3}$/（同左の負荷率）$_1$
＝（計画船に装備する主機関馬力）$_{1,\ 2,\ 3}$……(12)

その結果，母船型について上述の3通りの主機関馬力の装備計画の夫々の主機関馬力に対して，（上式の負荷率）$_1$ を乗じたものを航海時の主機出力として航海速力を推定計算し，単位操業日数3通りとの組み合わせの計9通りの操業計画と，それぞれに対応する各往復航海時の船の状態の復原性能，および，それらにもとずく漁期内の漁業採算性に関する諸計算を行うものとする。

5.4 船の復原力の検討

上記により9通りの各操業計画時の往復航海状態のそれぞれのGM，C_1 係数，および乾舷が求められるが，その計算過程で，各GMの値が表2の⑭にインプットされるGM基準値を下廻る場合には，軽荷排水量 $\varDelta_{LP}$（(10)式で求められる）の2.5パーセントの固定バラストを船底に積んでGM値の増大をはかる。そのGM値がまだ基準値に達しない場合は，GM値が基準値を上廻るまで，あるいは最大10回まで同様の計算を繰り返す。それでも往航，または復航のどちらか一つでもGM値が基準値に達しない場合には，表4に示すアウトプット中のSTAB 1，または2の欄にNOが打ち出され，基準値を上廻る場合はすべてYESが打ち出される。またそれらに関する C_1 係数の値は同表の C_{1-1}，および C_{1-2} に打

ち出され，もし $C_1<1.0$ であれば，GM 値が基準値を上廻っていても復原性不足として STAB の欄に NO が打ち出される。STAB が NO の場合は，その状態が安全性に欠けるとして最適船型および最適操業計画の選出候補から自動的に除外される。

また，大傾斜時の船の復原力の良否の判定指針となる中央乾舷値と指定した安全のための基準乾舷値（修正指定をした場合は修正された基準乾舷値，表3の⑭参照）との差が，表4中の乾舷1および2に打ち出される。前者が後者を下廻る場合，すなわち乾舷1または2の何れか一つでも負の値となった場合には，GMの場合と同様その状態が安全性に欠けるとして選出候補から自動的に除外される。

沿岸漁船の乾舷の安全限界を示す基準値は，小型漁船の性能基準として表示されているが，本プログラムでは同基準作成時に用いた数式 $F=D/15+0.20$ を用いて基準値を算出し，漁船の使用実態に応じた修正値をインプットしてそれに代数和したものを基準として用い，安全上の判断指針としている。乾舷は漁船の安全と同時に経営にも直結する重要な要素であるから，今後の技術研究の推移に応じて基準値の修正を行うことはあり得ると考える。

5.5　船の KG の推定

船の重心の高さKGは船の復原力判定に不可欠の要素で，船の軽荷状態に積載物を加算する方法で求めるのが普通であるが，本プログラムでは，復原力判定を行う出港，および漁場発状態時の KG/D の値を予めインプットしておくこととした。

そのようにした理由は，KGの値の船毎の相違が比較的大きく，計画船に対しては簡単な近似式による推定よりも信頼性の高い方法と考えられたからである。しかし，それだけに，インプットする両状態の KG/D の値は，船の使用実態調査等により，慎重に検討の上記入する必要がある。

5.6　変型シリーズ船型の算出

次に変型シリーズ船型を求めることとなるが，その方法は母船型を原型として，船型要素 L/B，B/D，C_P（ただし角型船型の高速範囲使用時に限って C_B），および lcb を夫々正負に若干量づつ単独に変化させることによって，原型近傍の8つの変型シリーズ船型を求めることとしている。

その際の正負の変化量は，実用船型の範囲を考慮して母船型の船型要素に応じて夫々下式のとおりとした。

L/B（1 ± 0.05）
B/D（1 ± 0.10）
C_B　（1 ± 0.05）または C_P（1 ± 0.05）
lcb　　$\pm1.0\%$

従って，主業に関する計算内容としては，上記の8変型シリーズ船型の夫々に対して母船型と同様の操業計画に対応した諸計算を行い，同様の結果が得られる。ただし，表2①の船型要素欄に1と記入時は計算しない。

5.7　最適船型とその最適操業計画の選定

以上の諸計算の結果，母船型および8変型船型の夫々に対して，9通りの操業計画と，それに対応する復原性および漁期間内の漁業採算性に関する諸計算結果が求められる。従って，上記の計81個の比較資料の中から，利益額または利益率が最高となる最適船型とその最適操業計画を容易に選出することができる。なお計画船の魚そうの容積は類似現存船のそれらに対して，船体寸法の相乗積，$L\times B\times D$ と比例するものとして算出し，その積載限度を超えて操業を行うこと無く，操業をストップして帰港するように航海計画に歯止めがかけられている。

ただし船全体としての過載については，5.4 に述べたとおり，最適船型および最適操業計画選定の際に選定対象から除外する措置を採っていることを附言する。

5.8　異る船型の利用対策

本プログラムでは，新船計画の際に高速用の半滑走型（いわゆる角型）船型のみではなく，中，大型漁船に多く用いられる排水量型（いわゆる丸型）船型の採用も可能のように考慮した。すなわち，その際に必要な有効馬力（EHP）推定式として，土屋の式4)の使用をインプット指定により可能とし，それに必要な10個の船型要素は以下の方法で求めることとした。

$L/\nabla^{\frac{1}{3}}$，B/T，C_M，C_P，lcb，a/A の諸船型要素は 5.2～5.4の諸計算値，またはインプット値による。

t/L，$\frac{1}{2}\alpha_e$，$\frac{1}{2}\alpha_r$，α_{BS} については船型の現状にもとづき，当分の間は次の諸式で与えることとした。

$t/L=0.05$
$\frac{1}{2}\alpha_e=133.0\times C_P-63.0$
$\frac{1}{2}\alpha_r=219.0\times C_P-105.0$
$\alpha_{BS}=193.0\times C_P-103.0$

なお，丸型船型の場合は EHP 推定式の速度範囲が，$F_{n\nabla}=0.45\sim0.80$ の間しかないので，それを外れた航海速度の漁船に対しては，本プログラムの利用はできない。従って，本プログラムでは軽量高速の沿岸漁船に対しては，角型船型の採用を前提とした計算を行う必要が

である。（図13参照）

図13中の2本の実線で画かれた曲線間が，丸型船型を使う場合の使理可能範囲であり，2本の破線で画かれた曲線間が角型船型を使う場合の使用可能範囲である。両者とも船の実用時の排水量（t）に応じて速力の使用可能限界がきめられるので，計算する航海速度の範囲がそれらの使用可能限界を外れる結果とならぬよう，特に丸型船型の主機関馬力の指定の際は十分の注意を要する。

5.9　漁業採算性の計算内容

① 計画船の漁業採算性に関する推定計算のうちFRP製計画船の船価の推定には(13)式が用いられている。

$$\text{船価}=K_1\times PLBD+SHP_{MP}(K_2\times SHP^2_{MP}+K_3\times SHP_{MP}+K_4)+K_5+K_6 \qquad \cdots\cdots(13)$$

ただし　$K_1=40.0$

$K_2=0.11\times10^{-4}$

$K_3=-0.5\times10^{-2}$

$K_4=3.50$

$K_5=100.0$

K_6＝特殊装備品価格（インプットによる）

(13)式は多数の実態調査資料をもとにして求めた推定式で，この様な簡単な式で船価を算出することは実際的ではないが，本プログラムが各種設計船の漁業採算性の相対比較を目的とするものであるので，同式の使用がその本質を著しく損うものではないと考える。

② 複数日操業時の平均魚価は，日帰り操業時の平均魚価と魚価低減率を用い(14)式で求める。

$$\text{平均魚価}(T)=\text{平均魚価}(1)\times\left(\frac{\beta}{100}\right)^{(T-1)} \qquad \cdots(14)$$

ただし　T：単位操業日数

β：魚価低減率（%）

平均魚価(1)：日帰り操業時の平均魚価（万円/kg）

平均魚価(T)：T日操業時の平均魚価　（万円/kg）

③ 年間総利益額は(15)式により求める。

年間総利益額＝年間総収入－年間総支出
＝(漁業A，BおよびCの各漁期内の総収入の和)－(漁業A，BおよびCの各漁期内の総支出の和)……(15)

④ 各漁期内の総収入は(16)式により求める。

各漁期内の総収入＝(各漁期内の活魚の総漁獲量)
×(同平均魚価)
＋(各漁期内の保蔵魚の総漁獲量)
×(同平均魚価)　　……(16)

⑤ 各漁期内の総支出は(17)式により求める。

各漁期内の総支出＝漁船の減価償却費＋借入金利息
＋租税公課＋乗員給料＋乗員歩合
＋燃料費＋氷代＋漁具費＋えさ代
＋泊地寄港費＋ドック費＋特殊装備費
＋雑費（含食料費，清水費，箱代）
……(17)

⑥ 各漁期内の漁船の減価償却費，借入金利息等は(18)～(20)式により求める。

$$\left(\begin{array}{l}\text{各漁期内の}\\\text{減価償却費}\end{array}\right)=\left(\frac{\text{建造船価}-\text{残存価格}}{\text{耐用年数}}\right)\times\left(\frac{\text{漁期日数}}{365}\right) \qquad \cdots\cdots(18)$$

$$\left(\begin{array}{l}\text{各漁期内の}\\\text{借入金利息}\end{array}\right)=(\text{建造船価})\times\left\{1.0-\frac{(\text{自己資本率})}{100}\right\}\times\frac{(\text{耐用年数}-\text{現在の船令})}{(\text{耐用年数})}\times\frac{(\text{借入金利率})}{100}\times\frac{(\text{漁期日数})}{365} \qquad \cdots\cdots(19)$$

$$\left(\begin{array}{l}\text{各漁期内の}\\\text{租税公課}\end{array}\right)=(\text{年間租税公課})\times\frac{(\text{漁期日数})}{365} \qquad \cdots\cdots(20)$$

⑦ 利益率は(21)，(22)式により求める。

$$\left(\begin{array}{l}\text{各漁期内の}\\\text{利益率}\end{array}\right)=\frac{(\text{各漁期内の総収入}-\text{同総支出})}{(\text{各漁期内の総収入})} \qquad \cdots\cdots(21)$$

$$(\text{年間利益率})=\frac{(\text{各漁期内の総収入の和}-\text{同総支出の和})}{(\text{各漁期内の総収入の和})} \qquad \cdots\cdots(22)$$

上記(15)～(22)式は薬室の式[5)~27)]を準用している。

6.　副業に関する計算の概要

主業に関する最適計画船が選定されれば，副業B，およびCに対する最適操業計画の選定については，同計画船を現存船と見なした計算を行うことにより，目的とする最適操業計画時の利益額または利益率が求められる。その方法は前記の主業と同様文献[28)]に述べられているので，ここではすべて省略する。

7.　最適設計船の選定

5，および6に記された方法により，最適計画船の主業A，および副業B，Cの夫々に対する最適操業計画時の利益額が求められるので，それらの代数和が年間の利益額となる。インプットの経済指標に利益額を指定すれば，それらの計算の結果，当初計画していた母船型を中心とした9個の系統船型を，当初想定した9個の操業計画で年間稼動した組合せの中の，最も高い利益額を挙げる最適船型とその最適操業計画，並びにその際の利益額が求められることになる。

従って，同様の方法で使用・環境条件，あるいは計画船の主要目の一部をさらに系統的に変化させて計算を繰り返せば，一層広範囲の設定条件件の変更範囲内で最適計画船の要目と，その年間利益額を見出すことができる。同様の計算を類似の現存船に対しても実施すれば，現存船に対する最適設計船の利益額の相対的な大小を定量的に求めることができる。ただしその場合には，計画船の船価が現存船のインプットした船価と相対的にみて不合理で無いことを確認する必要がある。

8. 計算例

8.1 対象漁船の要目等

計算例は本プログラムにより計画船のモデルとなる類似現存船と計画船との漁業採算性の比較をしたもので，対象とした現存船は神奈川県三崎港を基地とし，伊豆諸島周辺に出漁する７トン級の底魚一本釣を周年操業する沿岸漁船とした。計算の当初の目的は，本プログラムが計画通りに使えるものになっているかを調べることにあったが，計算の結果から興味ある示唆も得られたので併せて報告することとした。モデルとなった現存船とその関連資料は実態調査の結果から表６中の現存船の欄に記載され，また計画船としては同表の計画船の欄に示す諸数値を基準値として与えて計算を行った。この計画船は「沿岸漁船の操業効率の向上のための最適システム化」に関する特別研究（Ｓ56～58年）によって検討対象となったものである。計画船には，漁獲物の保蔵装置として微冷保蔵装置を装備するものとしたが，同装置を使えば漁獲後10～20日位までは漁獲物の鮮度の低下が極く僅かといわれる。そのため船価には2,000万円，その年間の保守整備費には約180万円を上積し，その船体重量増分として1.2トンを見込んだ。これらの数値は，特別研究の一環として(社)漁船協会に設けられたトータルシステム研究会[31)]において検討されたものである。また同装置の船上における保守の難しさを考慮して計画船の耐用年数は５年と仮定した。なお１日当りの魚価低減率については，現在の氷蔵方式では85パーセントであるのに対して，微冷保蔵方式を使う場合は98パーセントと仮定した。それに対応して，計画船の単位操業日数を日帰りから７日操業まで指定して計算を行い，それらの相互の漁業採算性の良否を比較することとした。その際の積載量の増加に備えて計画船の寸法は若干大きく指定している。計画船の操業期間，一操業当りの漁獲量，日帰り航海時の魚価，漁場までの距離，探魚時間率，燃油価格，船の建造費に対する自己資本率等は現存船のものと同一値としたが，計画船では船の寸法増大等の対策が行われ，復原・耐航性能の向上が予想されるため，休漁日率および荒天漂泊率を若干減少させた。

表６　計算例の類似現存船と計画船の主なインプット内容

Main In-Put Data of the Similar Existing Boat and the Planing Boat in the Following Simulation

項　　　　　目	既存船の基準値	計画船の基準値
総トン数	７トン型	８トン型(新トン)
L(水線長)	13.15m	14.80m
B	2.82m	3.20m
D	0.94m	1.07m
L×B×D	34.86m^3	50.68m^3(約1.45倍)
主機関装備馬力	250.0 PS	300.0 PS
船質	FRP	FRP
乗組員数	２人	２人
漁業種類	一本釣	一本釣
操業期間	周年	周年
漁獲量(１回操業当り)	26.5kg	26.5kg
魚価/kg (平均値)	900円	900円
漁場までの距離	50浬	50浬
探魚時間率	５％	５％
単位出漁日数	1,3,7日	1，3，7日
休業日率	54.0%	40.0%
荒天漂泊率	16.0%	10.0%
装備品価格	0	2,000万円 (含微冷保蔵装置)
〃　重量	0	1.20 t
ドック費／漁期	20万円	206万円 (含上記保修費)
魚価低減率／日	85%	98%
魚そう容積	7.43m^3	10.80m^3
船価	2,330万円	5,427万円 (含上記装置)
自己資本率	21.5%	21.5%
燃油価格／kℓ	7.5万円	7.5万円

本計算においては，計画船の船型を固定することとし，その近傍の系統船型までを含めた計算は行わなかった。しかし，他の要素，すなわち単位操業日数，装備する主機関馬力，漁場までの距離，魚価，一回操業当りの漁獲量，L×B×D，休漁日率，荒天漂泊率，探魚時間率，漁場から仮泊地までの距離，船の耐用年数，特別装備品価格等を各々基準値から単独に変化させた系統的な計算を行い，それらの漁業経営におよぼす影響を調べた。

8.2 アウトプットの例示

同計算のアウトプット表の中から重要なものを抜き出して表７～11に例示する。

表 7.1 インプットデータの打出し表の一例

An Example of the Out-Put Table of In-Put Data

```
      ｺ ﾒ ﾝ ﾄ
TOKIN MARU-2
   G T       L WL       B          B BUL      BC         D          H BUL      V TO       DIST.TO    ﾌｶﾘﾂ ﾄﾗｲ
   7.00     13.15       2.82       3.40       2.82       0.94       0.65       0.         0.         0.
   SHP MO    SHP AO     FOT        FWT        STEEL      FRP        WOOD        APD.MASS    SA/A       ｾﾝｹｲ
 250.00      0.         3.50       0.63       0.         1.         0.            1.50      0.          ｶｸ
   DIST       T         LCB        PC         KB         BM         K/B        CW         CM
  15.41      0.55      -4.94       0.45       0.31       1.38       0.49       0.99       0.87
  10.92      0.42      -4.37       0.50       0.22       1.95       0.55       0.96       0.83
   AO/LB     HO/D       ｾｲｽｲ ｼﾖｳﾋ ｼﾖｸﾘﾖｳ ｼﾖｳﾋ
   2.09      1.73      11.00       2.00
   ｾﾝｶ       ｾﾝﾚｲ       ﾀｲﾖｳ ﾈﾝ   ｻﾞﾝｿﾞﾝ ｶｶｸ   ｼﾞｺ ｼﾎﾝﾘﾂ   ﾘﾘﾂ     ｺｵﾘ ｶｶｸ    ﾈﾝﾕ ｶｶｸ
2330.00      0.        10.00     500.00      21.50       3.30       0.77       7.50

ｹｲｶｸｾﾝ
 LBD        SHP.M.F     SHP.A.F    DEL.CP    PC.F       PC.L       ｿｳﾋﾞｶｶｸ     ﾀｲﾖｳﾈﾝ          L/B      B/D     ｾﾝｹｲ      ｾﾝｼﾂ
  50.67     300.00      10.00     -0.070     0.500      0.55      2000.00         5.00          4.63     2.99    ｶｸ       FRP
 ｷﾞﾖｷ ｶｲｼ   ｷﾞﾖｷ ｵﾜﾘ   ｼﾞﾕﾝﾋﾞﾋﾞ   ﾄﾞﾂｸ ﾋﾞ   ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ ｷﾖﾘ   ﾊｸﾁ ｷﾖﾘ    ﾀﾝｷﾞﾖ ﾘﾂ   ﾐｽﾞｱｹﾞ ｼﾞｶﾝ   ｷﾕｳﾖｳ ｼﾞｶﾝ   ｿｳｷﾞﾖｳ ｼﾞｶﾝ
      1         365       24.00        8.00         50.00         5.00        5.00         3.00          5.00         0.10
  ｼﾂﾘﾖｳ ﾆﾂｽｳ                     ﾊｸﾁ ｷﾕｳﾖｳ ﾆﾂｽｳ                 ｷﾞﾖ ｶｸ(ｲｹｽ)  ｷﾞﾖｶｸ(ﾎｿﾞｳ)   ｺｵﾘ ﾘﾖｳ   ﾊｺ ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ   ｴｻ ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ
      1.        3.         7.         0          2          6          0.            3.30      300.00         0.          30.00
  ｲｹｽ ﾘﾖｳ  ｶｲｽｲ/ﾖｳﾘﾖｳ    ｷﾞﾖｶｸ/ｶｲｽｲ        ﾎｿﾞｳ ﾘﾖｳ   ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ/ﾖｳｾｷ   ｷﾞﾖｶｸ/ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ   ｷﾞﾖｸﾞｼﾞﾕｳﾘﾖｳ    ｿｳﾋﾞｼﾞﾕｳﾘﾖｳ
   0.          0.             0.               7.43          1.000          0.450           0.050          0.
  ｼﾕｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)    ﾌｸﾛ    ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ   ｼﾕｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)    ﾌｸﾛ    ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ   ｼﾕｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)    ﾌｸﾛ    ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ
      80.000    80.000    2.000        60.000    60.000     2.000        40.000    40.000     2.000
  ﾎｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)     ﾌｸﾛ    ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ
      80.000    80.000   80.000
  KG/D 1     KG/D 2      U         GM R       N20        ｷﾕｳｷﾞﾖｳ ﾋﾞ ﾘﾂ     ｺｳﾃﾝ ﾋﾖｳﾊｸ ﾘﾂ    ﾎｰﾃｰｶﾝｹﾞﾝ ｼﾕｳｾｲﾁ
     0.97       0.96    10.00       0.35       0.05              54.00             16.00               0.
  ｷﾞﾖｶ(ｲｹｽ) ｷﾞﾖｶ(ﾎｿﾞｳ) ｼﾞﾝｹﾝﾋ     ﾉﾘｸﾐｲﾝ    ｻﾞﾂﾋﾟ   ﾌﾞｱｲ ﾘﾂ   ｷﾞﾖｸﾞ ﾋ    ｴｻ ﾀﾞｲ    ﾊｸﾁ ﾋﾖｳ    ﾄﾞﾂｸ ﾋ      ｷﾞﾖｶ ｹﾞﾝﾘﾂ
   0.          0.09      25.00          2       74.62      40.00      28.10       2.08       0.50      20.00       85.00
ｹｲｶｸｾﾝ
  ｷﾞﾖｶ(ｲｹｽ) ｷﾞﾖｶ(ﾎｿﾞｳ) ｼﾞﾝｹﾝﾋ     ﾉﾘｸﾐｲﾝ    KG/D1      KG/D2       U       N20         ｷﾕｳｷﾞﾖｳ ﾋﾞ ﾘﾂ    ｺｳﾃﾝ ﾋﾖｳﾊｸ ﾘﾂ    ｷﾞﾖｶ ｹﾞﾝﾘﾂ
   0.          0.09      20.80          2          0.95       0.96    15.00      0.05               40.00         10.00          98.00
  ｷﾞﾖｸﾞｼﾞﾕｳﾘﾖｳ     ｿｳﾋﾞｼﾞﾕｳﾘﾖｳ     ﾄﾞﾂｸ ﾋ
          0.06               1.20   206.00
```

表 7.2　計画船の要目等の打出し表の一例

An Example of the Principal Data of a Planing Boat

```
      ｺ ﾒ ﾝ ﾄ
TOKIN MARU-2          ｹｲｶｸ        CP-
   GT       L        B        B BUL       BC         D        H BUL    L/B      L/D      B/D       LBD        ｾﾝｼﾂ       ｾﾝｹｲ
  10.18 ･14.80    3.20     3.86       3.20       1.07      0.65     4.63     13.83     2.99     50.67       FRP        ｶｸ  ､
   SHP M         SHP A         FOT          FWT         ｲｹｽ            ﾚｲｿﾞｳ
 240.00        10.00          5.09         0.916     0.            10.80
   DIST            T           LCB          PC           KB            BM            K/B          CW           CM
  22.40          0.62         -4.94        0.50         0.35          1.56          0.49         0.99          0.87
  12.10          0.34         -4.37        0.55         0.25          3.05          0.55         0.96          0.83
   AO/LB         HO/D         ｾｲｽｲ ｼﾖｳﾋ ｼﾖｸﾘﾖｳ ｼﾖｳﾋ
   2.09          1.73        11.00         2.00
   ｾﾝｶ           ｾﾝﾚｲ         ﾀｲﾖｳ ﾈﾝ   ｻﾞﾝｿﾞﾝ ｶｶｸ   ｼﾞｺ ｼﾎﾝﾘﾂ     ﾘﾘﾂ     ｺｵﾘ ｶｶｸ     ﾈﾝﾕ ｶｶｸ
5084.00          0.          5.00      500.00       21.50          3.30        0.77          7.50
  ｷﾞﾖｷ ｶｲｼ   ｷﾞﾖｷ ｵﾜﾘ   ｼﾞﾕﾝﾋﾞﾋﾞ     ﾄﾞﾂｸ ﾋﾞ    ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ ｷﾖﾘ     ﾊｸﾁ ｷﾖﾘ      ﾀﾝｷﾞﾖ ﾘﾂ     ﾐｽﾞｱｹﾞ ｼﾞｶﾝ      ｷﾕｳﾖｳ ｼﾞｶﾝ      ｿｳｷﾞﾖｳ ｼﾞｶﾝ
        1          365        24.00          8.00          50.00           5.00           5.00            3.00             5.00           0.10
  ｼﾂﾘﾖｳ ﾆﾂｽｳ                           ﾊｸﾁ ｷﾕｳﾖｳ ﾆﾂｽｳ                          ｷﾞﾖ ｶｸ(ｲｹｽ)   ｷﾞﾖｶｸ(ﾎｿﾞｳ)      ｺｵﾘ ﾘﾖｳ     ﾊｺ ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ     ｴｻ ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ
       1.          3.           7.             0             2              6           0.             3.30           300.00           0.             30.00
  KG/D 1      KG/D 2        U            GM R          N20          ｷﾕｳｷﾞﾖｳ ﾋﾞ ﾘﾂ      ｺｳﾃﾝ ﾋﾖｳﾊｸ ﾘﾂ      ﾎｰﾁｰｶﾝｹﾞﾝ ｼﾕｳｾｲﾁ
     0.97       0.96       15.00         0.35         0.05               40.00              10.00              0.
  ｷﾞﾖｶ(ｲｹｽ) ｷﾞﾖｶ(ﾎｿﾞｳ) ｼﾞﾝｹﾝﾋ      ﾉﾘｸﾐｲﾝ       ｻﾞﾂﾋﾟ     ﾌﾞｱｲ ﾘﾂ      ｷﾞﾖｸﾞ ﾋ      ｴｻ ﾀﾞｲ     ﾊｸﾁ ﾋﾖｳ      ﾄﾞﾂｸ ﾋ         ｷﾞﾖｶ ｹﾞﾝﾘﾂ
   0.          0.09       20.80            2         74.62        40.00         28.10         2.08        0.50        206.00        98.00
  ｲｹｽ ﾘﾖｳ    ｶｲｽｲ/ﾖｳﾘﾖｳ     ｷﾞﾖｶｸ/ｶｲｽｲ          ﾎｿﾞｳ ﾘﾖｳ     ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ/ﾖｳｾｷ     ｷﾞﾖｶｸ/ｼﾞﾕｳﾘﾖｳ     ｷﾞﾖｸﾞｼﾞﾕｳﾘﾖｳ     ｿｳﾋﾞｼﾞﾕｳﾘﾖｳ
    0.            0.               0.                   10.80           1.000            0.450             0.060            1.200
  ｼﾕｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)     ﾌｸﾛ     ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ   ｼﾕｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)     ﾌｸﾛ     ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ   ｼﾕｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)    .ﾌｸﾛ     ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ
      80.000     80.000     2.000
  ﾎｷ ﾌｶﾘﾂ(ｵｳﾛ)     ﾌｸﾛ    ｷﾞﾖｼﾞﾖｳ
      80.000     80.000    80.000
```

表7はインプットした数値を概ねそのままアウトプットしたもの（4章参照），表8はモデルとなった現存船の単位操業日数別，主機関負荷率別（すなわち往復航海時の速力別と同義）の9組の計算結果の要約を打ち出したもの，表9は計画船に対して同様の計算結果を打ち出したもの，表10は計画船の9組の計算結果の中から，安全性の許容限度内で最も利益額が高い最適操業計画時の計算結果と現存船のそれとを比較表示したものである。

なお，上記の計算例とは別に，年間3種類の漁業を行う沿岸漁船に対する計算の中から，表10に相当するアウトプットの一例を表11に示す。同表には主業の漁期内で計画船の上記の9組の操業計画の中の最も利益率の高い操業計画時の計算結果の要約が，現存船との対比の形で打ち出され，次いで副業BおよびCについて同様の計算結果の要約が打ち出され，最後の一行にそれらの代数和である年間収支と利益額が打ち出されている。

8.3　計算結果の考察

⑴　複数日操業の効果と航海速力の影響

図2は，計画船の単位操業日数を横軸に底魚一本釣漁業の年間の利益率を縦軸にとり，一連の計算結果を実線で結んだものである。3本の実線は夫々装備する主機関の馬力が相違した場合を示し，往復航海時の主機関の負荷率をすべて80パーセントとしている。各実線の（　）内の数値がその際の出力（馬力）を表わしている。利益率は比で示す。(20，21式参照)

各線側に往復航海速力の平均値を参考のため示している。操業日数によって船の排水量が多少変り，それに応じて同一主機関馬力でも航海速力が異るので，1，3および7日操業時の各速力の値を記入して参考に供した。同図中の破線は比較のため対応する類似現存船の計算結果を示したものである。これらの結果から，計画船は4日以上の操業航海の場合に，また現存船は2～3日操業航海の場合に利益率がよいことが知られる。

現存船で4日以上の操業航海をする場合には魚価の低落により利益率が急激におち，また7日操業時には過載で船の乾舷が不足し，安全上にも問題が生じることが知られる。

表 8 様式Cのアウトプットの一例（類似現存船）

An Example of the Out-Put on Format C for an Existing Boat

```
IPPONZURI            ｷｿﾞﾝ        ｷﾎﾝ

DISP.1     T.1     L/V.1     B/T.1      CB.1      CP.1     LCB.1      AE.1      AR.1     ABS.1
DISP.2     T.2     L/V.2     B/T.2      CB.2      CP.2     LCB.2      AE.2      AR.2     ABS.2
           V.1    SHPM.1    SHPA.1     BAL.1      GM.1      C1.1       PC1   ﾈﾝﾕ ﾘｮｳ  ｾｲｽｲ ﾘｮｳ   ｷﾞｮｸﾞ        SHPM.F              STAB.1  ｶﾝｹﾞﾝ.1
           V.2    SHPM.2    SHPA.2     BAL.2      GM.2      C1.2       PC2     ｶﾂｷﾞｮ  ﾚｲｿﾞｳｷﾞｮ                SHPA.F              STAB.2  ｶﾝｹﾞﾝ.2
                ｼｭﾂﾘｮｳﾆﾁ ｼｭﾂﾘｮｳｶｲ ｼｭﾂﾘｮｳｹｲ ｼｭﾂﾘｮｳﾘﾂ ｿｳｷﾞｮｳｹｲ  ｵｷﾊｸ  ｷｮｳ ｶｲ     ｶﾂｷﾞｮ     ﾚｲｷﾞｮ  ｷﾞｮｶｸｹｲ
                 ｾﾝｶ      ﾈﾝﾋﾟｹｲ    ｼﾞﾝｹﾝ ﾋ,                        ｹｲﾋ ｹｲ             ｶﾂｷﾞｮｳﾘ   ﾚｲｷﾞｮｳﾘ  ｿｳｳﾘｱｹﾞ      ﾘｴｷｹｲ      ﾘｴｷﾘﾂ
  12.14     0.45    5.770     6.247     0.620     0.739    -4.524
  12.36     0.46    5.734     6.155     0.624     0.741    -4.553
          12.135  200.000        0.        0.     1.086     1.703     0.486     0.363     0.022     0.050      250.000              YES  0.23
          11.982  200.000        0.        0.     1.060     1.710     0.484        0.     0.201                     0.              YES  0.22
                     1.00    153.00       153     0.420      9333         0         0        0.    30.799    30.799
                    2330.    417.06   1043.10                         2255.84                  0.   2910.50   2910.50    654.66     0.225
  12.11     0.45    5.774     6.258     0.619     0.738    -4.521
  12.28     0.46    5.747     6.188     0.622     0.740    -4.543
          10.589  150.000        0.        0.     1.090     1.702     0.487     0.332     0.022     0.050      250.000              YES  0.23
          10.489  150.000        0.        0.     1.070     1.708     0.485        0.     0.168                     0.              YES  0.22
                     1.00    153.00       153     0.420      7803         0         0        0.    25.750    25.750
                    2330.    380.81    866.75                         2043.24                  0.   2433.37   2433.37    390.13     0.160
  12.07     0.45    5.780     6.274     0.619     0.738    -4.516
  12.19     0.45    5.761     6.225     0.621     0.739    -4.531
           9.298  100.000        0.        0.     1.095     1.701     0.487     0.285     0.022     0.050      250.000              YES  0.23
           9.264  100.000        0.        0.     1.081     1.706     0.486        0.     0.135                     0.              YES  0.22
                     1.00    153.00       153     0.420      6273         0         0        0.    20.701    20.701
                    2330.    326.80    697.50                         1819.98                  0.   1956.23   1956.23    136.25     0.070
  13.06     0.48    5.631     5.890     0.635     0.749    -4.642
  15.05     0.54    5.370     5.243     0.663     0.765    -4.895
          11.522  200.000        0.        0.     0.978     1.722     0.476     0.601     0.066     0.050      250.000              YES  0.20
          10.468  200.000        0.        0.     0.805     1.746     0.454        0.     1.132                     0.              YES  0.14
                     3.00     51.00       153     0.420     17493         0       102        0.    57.727    57.727
                    2330.    229.79   1509.96                         2586.43                  0.   3941.38   3941.38   1354.95     0.344
  13.00     0.48    5.639     5.911     0.634     0.749    -4.634
  14.97     0.54    5.380     5.268     0.662     0.765    -4.884
          10.146  150.000        0.        0.     0.984     1.721     0.477     0.535     0.066     0.050      250.000              YES  0.20
           9.681  150.000        0.        0.     0.811     1.746     0.455        0.     1.102                     0.              YES  0.14
                     3.00     51.00       153     0.420     17034         0       102        0.    56.212    56.212
                    2330.    204.45   1478.73                         2529.86                  0.   3837.96   3837.96   1308.10     0.341
  12.94     0.48    5.648     5.935     0.633     0.748    -4.626
  14.86     0.53    5.393     5.299     0.660     0.764    -4.870
           9.060  100.000        0.        0.     0.991     1.720     0.478     0.458     0.066     0.050      250.000              YES  0.20
           8.645  100.000        0.        0.     0.819     1.745     0.456        0.     1.063                     0.              YES  0.15
                     3.00     51.00       153     0.420     16422         0       102        0.    54.193    54.193
                    2330.    175.19   1435.28                         2457.15                  0.   3700.07   3700.07   1242.92     0.336
  14.90     0.53    5.389     5.289     0.661     0.764    -4.875
  20.42     0.70    4.851     4.046     0.714     0.779    -5.577
          10.527  200.000        0.        0.     0.815     1.744     0.456     1.068     0.154     0.050      250.000              YES  0.14
           9.485  200.000        0.        0.     0.558     1.709     0.394        0.     3.000                     0.              YES -0.02
                     7.00     22.00       154     0.423     19998         0       132        0.    65.993    65.993
                    2330.    176.16    883.76                         1928.91                  0.   2352.05   2352.05    423.14     0.180
  14.79     0.53    5.402     5.321     0.660     0.763    -4.861
  20.32     0.69    4.859     4.064     0.713     0.779    -5.564
           9.724  150.000        0.        0.     0.823     1.743     0.457     0.940     0.154     0.050      250.000              YES  0.15
           8.780  150.000        0.        0.     0.561     1.711     0.395        0.     2.963                     0.              YES -0.02
                     7.00     22.00       154     0.423     19756         0       132        0.    65.195    65.195
                    2330.    155.04    885.82                         1904.85                  0.   2323.58   2323.58    418.74     0.180
  14.68     0.53    5.416     5.354     0.658     0.763    -4.847
  20.18     0.69    4.870     4.088     0.712     0.779    -5.546
           8.678  100.000        0.        0.     0.831     1.742     0.458     0.810     0.154     0.050      250.000              YES  0.15
           7.855  100.000        0.        0.     0.565     1.713     0.397        0.     2.911                     0.              YES -0.01
                     7.00     22.00       154     0.423     19404         0       132        0.    64.033    64.033
                    2330.    133.65    877.82                         1875.46                  0.   2282.18   2282.18    406.73     0.178
```

表 9 様式Cのアウトプットの一例（計画船）

An Example of the Out-Put on Format C for a Planing Boat

```
IPPONZURI         ｹｲｶｸ       ｷﾎﾝ

DISP.1    T.1    L/V.1     B/T.1    CB.1    CP.1    LCB.1    AE.1    AR.1      ABS.1
DISP.2    T.2    L/V.2     B/T.2    CB.2    CP.2    LCB.2    AE.2    AR.2      ABS.2
         V.1   SHPM.1    SHPA.1    BAL.1    GM.1    C1.1    PC1    ﾈﾝﾕ ﾘﾖｳ   ｾｲｽｲ ﾘﾖｳ  ｷﾞﾖｸﾞ            SHPM.F     STAB.1   ｶﾝｹﾞﾝ.1
         V.2   SHPM.2    SHPA.2    BAL.2    GM.2    C1.2    PC2    ｶﾂｷﾞﾖ    ﾚｲｿﾞｳｷﾞﾖ                    SHPA.F      STAB.2  ｶﾝｹﾞﾝ.2
               ｼﾕﾂﾘﾖｳﾆﾁ ｼﾕﾂﾘﾖｳｶｲ  ｼﾕﾂﾘﾖｳｹｲ ｼﾕﾂﾘﾖｳﾘﾂ  ｿｳｷﾞﾖｳｹｲ  ｵｷﾊｸ  ｷｺｳ ｶｲ     ｶﾂｷﾞﾖ    ﾚｲｷﾞﾖ    ｷﾞﾖｶｸｹｲ
                ｾﾝｶ      ﾈﾝﾋﾟｹｲ   ｼﾞﾝｹﾝ ﾋ,                   ｹｲﾋ ｹｲ          ｶﾂｷﾞﾖｳﾘ    ﾚｲｷﾞﾖｳﾘ   ｿｳｳﾘｱｹﾞ    ﾘｴｷｹｲ     ﾘｴｷﾘﾂ
  14.73    0.41    6.089   7.724   0.565   0.674  -4.515
  14.98    0.42    6.053   7.594   0.567   0.675  -4.530
         13.239  240.000   8.000   0.      1.349   1.309   0.537    0.437    0.022     0.060           300.000        YES    0.38
         13.098  240.000   8.000   0.      1.301   1.312   0.536   0.        0.234                      10.000        YES    0.38
                    1.00  199.00     199   0.547   14129         0        0     0.        46.626    46.626
                5084.     652.00  888.06                     3621.34            0.       4196.31   4196.31    574.98     0.137
  14.28    0.40    6.151   7.999   0.564   0.674  -4.507
  14.53    0.41    6.116   7.868   0.566   0.675  -4.520
         12.087  192.000   8.000   0.      1.423   1.292   0.538    0.383    0.022     0.060           240.000        YES    0.40
         11.966  192.000   8.000   0.      1.374   1.296   0.537   0.        0.214                      10.000        YES    0.39
                    1.00  199.00     199   0.547   12935         0        0     0.        42.685    42.685
                4891.     572.34  798.01                     3401.81            0.       3841.70   3841.70    439.89     0.115
  13.86    0.39    6.213   8.287   0.564   0.674  -4.501
  14.05    0.39    6.184   8.172   0.566   0.675  -4.511
         10.750  144.000   8.000   0.      1.500   1.275   0.539    0.348    0.022     0.060           180.000        YES    0.41
         10.677  144.000   8.000   0.      1.455   1.277   0.538   0.        0.185                      10.000        YES    0.41
                    1.00  199.00     199   0.547   11144         0        0     0.        36.775    36.775
                4719.     519.05  624.31                     3130.43            0.       3309.77   3309.77    179.34     0.054
  15.73    0.44    5.957   7.245   0.573   0.680  -4.571
  17.85    0.50    5.711   6.404   0.586   0.689  -4.688
         12.706  240.000   8.000   0.      1.211   1.341   0.532    0.768    0.066     0.060           300.000        YES    0.36
         11.705  240.000   8.000   0.      0.970   1.389   0.522   0.        1.244                      10.000        YES    0.30
                    3.00   66.00     198   0.544   24882         0      132     0.        82.111    82.111
                5084.     380.15 2131.73                     4656.84            0.       7097.31   7097.31   2440.47     0.344
  15.26    0.43    6.017   7.496   0.572   0.679  -4.559
  17.38    0.49    5.762   6.591   0.585   0.688  -4.672
         11.626  192.000   8.000   0.      1.277   1.326   0.533    0.679    0.066     0.060           240.000        YES    0.37
         10.850  192.000   8.000   0.      1.018   1.379   0.523   0.        1.221                      10.000        YES    0.31
                    3.00   66.00     198   0.544   24420         0      132     0.        80.586    80.586
                4891.     336.20 2116.52                     4547.87            0.       6965.53   6965.53   2417.66     0.347
  14.80    0.41    6.078   7.758   0.571   0.679  -4.549
  16.90    0.47    5.816   6.796   0.584   0.688  -4.657
         10.436  144.000   8.000   0.      1.346   1.310   0.534    0.612    0.066     0.060           180.000        YES    0.39
         10.113  144.000   8.000   0.      1.070   1.367   0.525   0.        1.191                      10.000        YES    0.33
                    3.00   66.00     198   0.544   23826         0      132     0.        78.626    78.626
                4719.     302.89 2079.83                     4433.43            0.       6796.10   6796.10   2362.62     0.348
  17.73    0.50    5.723   6.446   0.586   0.688  -4.681
  23.55    0.66    5.207   4.881   0.610   0.698  -5.004
         11.754  240.000   8.000   0.      0.992   1.392   0.523    1.430    0.154     0.060           300.000        YES    0.30
         10.592  240.000   8.000   0.      0.600   1.446   0.494   0.        3.260                      10.000        YES    0.14
                    7.00   28.00     196   0.538   27664         0      168     0.        91.291    91.291
                5084.     300.21 2230.73                     4689.29            0.       7278.27   7278.27   2588.98     0.356
  17.19    0.48    5.782   6.662   0.584   0.688  -4.662
  23.06    0.64    5.243   4.980   0.608   0.697  -4.975
         10.900  192.000   8.000   0.      1.047   1.380   0.524    1.264    0.154     0.060           240.000        YES    0.32
         10.110  192.000   8.000   0.      0.622   1.445   0.497   0.        3.234                      10.000        YES    0.16
                    7.00   28.00     196   0.538   27440         0      168     0.        90.552    90.552
                4891.     265.38 2241.02                     4614.93            0.       7219.33   7219.33   2604.40     0.361
  16.69    0.47    5.840   6.882   0.583   0.688  -4.646
  22.58    0.63    5.280   5.084   0.607   0.697  -4.949
         10.142  144.000   8.000   0.      1.104   1.367   0.526    1.136    0.154     0.060           180.000        YES    0.33
          9.590  144.000   8.000   0.      0.646   1.444   0.499   0.        3.208                      10.000        YES    0.17
                    7.00   28.00     196   0.538   27216         0      168     0.        89.813    89.813
                4719.     238.58 2245.92                     4548.64            0.       7160.40   7160.40   2611.76     0.365
```

表 10　様式 d のアウトプットの一例（計画船で年間1漁種の場合）

An Example of Out-Put on Format d in Case of Planing Boat operating 1 Kind Fishing through a Year

```
DISP.1     T.1     L/V.1     B/T.1     CB.1     CP.1    LCB.1      AE.1      AR.1       ABS.1
DISP.2     T.2     L/V.2     B/T.2     CB.2     CP.2    LCB.2      AE.2      AR.2       ABS.2
           V.1    SHPM.1    SHPA.1    BAL.1     GM.1    C1.1       PC1      ﾈﾝﾕ ﾘﾖｳ   ｾｲｽｲ ﾘﾖｳ   ｷﾞﾖｸﾞ                SHPM.F     STAB.1   ｶﾝｹﾞﾝ.1
           V.2    SHPM.2    SHPA.2    BAL.2     GM.2    C1.2       PC2      ｶﾂｷﾞﾖ     ﾚｲｿﾞｳｷﾞﾖ                         SHPA.F      STAB.2   ｶﾝｹﾞﾝ.2
                  ｼﾕﾂﾘﾖｳﾆﾁ ｼﾕﾂﾘﾖｳｶｲ ｼﾕﾂﾘﾖｳｹｲ ｼﾕﾂﾘﾖｳﾘﾂ  ｿｳｷﾞﾖｳｹｲ  ｵｷﾊｸ  ｷｺｳ ｶｲ     ｶﾂｷﾞﾖ     ﾚｲｷﾞﾖ      ｷﾞﾖｶｸｹｲ
                  ｾﾝｶ       ﾈﾝﾋﾟｹｲ    ｼﾞﾝｹﾝ ﾋ,                      ｹｲﾋ ｹｲ              ｶﾂｷﾞﾖｳﾘ   ﾚｲｷﾞﾖｳﾘ   ｿｳｳﾘｱｹﾞ     ﾘｴｷｹｲ       ﾘｴｷﾘﾂ

IPPONZURI            ｷｿﾞﾝ
  13.06     0.48    5.631     5.890    0.635    0.749   -4.642    0.       0.        0.
  15.05     0.54    5.370     5.243    0.663    0.765   -4.895    0.       0.        0.
          11.522  200.000     0.       0.       0.978    1.722    0.476     0.601     0.066     0.050         250.000                   0.20
          10.468  200.000     0.       0.       0.805    1.746    0.454     0.        1.132                      0.                     0.14
                    3.00     51.00    153.      0.420   17493.        0.        102.       0.        57.727    57.727
                  2330.     229.79   1509.96                          2586.43                0.      3941.38   3941.38    1354.95    0.344

IPPONZURI            ｹｲｶｸ
  16.68     0.46    5.841     6.883    0.554    0.653   -4.646    0.       0.        0.
  22.60     0.63    5.279     5.082    0.577    0.662   -4.950    0.       0.        0.
          10.166  144.000     8.000    0.       1.200    1.367    0.526     1.131     0.154     0.060         180.000                   0.33
           9.700  144.000     8.000    0.       0.714    1.444    0.499     0.        3.214                  10.000                   0.17
                    7.00     28.00    196.      0.538   27272.        0.        168.       0.        89.998    89.998
                  4719.     237.61   2252.20                          4553.95                0.      7175.13   7175.13    2621.18    0.365

ｹｲﾋ ｺﾞｳｹｲ    4553.95 ﾐｽﾞｱｹﾞ ｺﾞｳｹｲ    7175.13 ﾘｴｷ ｺﾞｳｹｲ      2621.18
```

なお，日帰り操業の場合，特に現存船では往復の航海速力を上げると，燃料費の増加にも拘らず利益率が大巾に好転することが注目される。その原因は往復航海速力の大小が漁場滞在時間の長短に直結するからで，極端に速力が遅い場合には漁場滞在時間が0となり，漁獲がなくなることを考えれば容易に理解されることである。本計算では漁場までの距離が50浬で，沿岸漁船としてはかなり遠い。

図3は計画船の計算結果を示すが，漁場までの距離の大小が利益率におよぼす影響を示す資料で，上述の内容をよく説明している。図3および4で，2日以上の操業航海時に利益率に対する速力の影響があまり大きくないのは，単位操業日数中の航海時間に比べて操業時間の割合が大巾に増えているからである。図4は計画船に装備する主機関馬力（連続定格馬力）の大小，すなわち本計算においては往復航海速力の大小が利益率におよぼす影響を示す。同図も上述の内容をよく物語っており，300馬力をこえる大馬力の主機関を装備し，15ノット以上の航海速力を出しても，殆んど利益にはつながらないのは興味深い。

⑵　魚価と漁獲量の影響

漁獲物の単価と，1回操業当りの漁獲量の大小が利益率に及ぼす影響は図5と6に示され，採算分岐点を知るのに便利である。計画船は微冷保蔵装置を持つので，7日操業時の利益率への影響が注目される。

⑶　その他の要素の影響

図7にはL×B×Dで示される船規模の影響が示されるが，1日操業をする場合，計画船は大きすぎることを物語っている。図8には休業日率の影響が示される。休業は荒天のため，あるいは魚群が薄いためなどの理由によると思われるが，その利益率におよぼす影響は小さくないので，その改善策を考える必要があるように思われる。図9の探魚時間率についても同様である。図10，11には微冷保蔵装置を装備する漁船の耐用年数と特別装備品価格の利益率に及ぼす影響が示される。これらから，今後沿岸漁船が微冷保蔵装置を装備することの得失と，同装置に期待される信頼性と価格の概要を把むことができる。図12では計画船の利益率が燃油価格の変動によってどの程度影響されるかを知ることが出来，日帰り操業の場合の燃油値上りのきびしさを物語っている。

9.　使用上の注意

1）本プログラムによる計算は，沿岸漁船漁業をとりまく多くの使用・環境条件をインプットし，その条件下での漁業採算性が算出されるので，それらの条件設定を

表 11　様式 d のアウトプットの一例（計画船で年間 3 漁種の場合）

An Example of Out-Put on Format d in Case of Planing Boat operating 3 Kind Fishings in a Year

```
DISP.1     T.1    L/V.1    B/T.1    CB.1    CP.1    LCB.1    AE.1    AR.1     ABS.1
DISP.2     T.2    L/V.2    B/T.2    CB.2    CP.?    LCB.2    AE.2    AR.2     ABS.2
          V.1   SHPM.1    SHPA.1   BAL.1    GM.1    C1.1    PC1     ﾈﾝﾕ ﾘﾖｳ ｾｲｽｲ ﾘﾖｳ  ｷﾞﾖｸﾞ           SHPM.F     STAB.1   ｶﾝｹﾞﾝ.1
          V.2   SHPM.2    SHPA.2   BAL.2    GM.2    C1.2    PC2     ｶﾂｷﾞﾖ   ﾚｲｿﾞｳｷﾞﾖ                  SHPA.F      STAB.2   ｶﾝｹﾞﾝ.2
                ｼﾕﾂﾘﾖｳﾆﾁ ｼﾕﾂﾘﾖｳｶｲ ｼﾕﾂﾘﾖｳｹｲ ｼﾕﾂﾘﾖｳﾘﾂ  ｿｳｷﾞﾖｳｹｲ  ｵｷﾊｸ  ｷｺｳ ｶｲ   ｶﾂｷﾞﾖ   ﾚｲｷﾞﾖ    ｷﾞﾖｶｸｹｲ
                ｾﾝｶ     ﾈﾝﾋﾟｹｲ   ｼﾞﾝｹﾝ ﾋ,                    ｹｲﾋ ｹｲ         ｶﾂｷﾞﾖｳﾘ  ﾚｲｷﾞﾖｳﾘ  ｿｳｳﾘｱｹﾞ    ﾘｴｷｹｲ     ﾘｴｷﾘﾂ

IPPONTSURI         ｷｿﾞﾝ
    6.93    0.42   5.553   5.503   0.593   0.701  -0.112   0.      0.      0.
    7.21    0.43   5.482   5.307   0.597   0.700  -0.473   0.      0.      0.
          11.159 121.550  0.      0.       0.667   1.786   0.468    0.209    0.033    0.020          187.000              0.34
          10.741 121.550  0.      0.       0.635   1.794   0.459    0.       0.187                     0.                 0.32
                    1.00  117.00    117.   0.429   1287.       0.       0.      0.       21.879    21.879
                 1945.   182.97   853.46                    1712.68             0.      1969.11   1969.11    256.43   0.130

IPPONTSURI         ｹｲｶｸ
   10.37    0.52   5.504   4.820   0.593   0.688  -0.991   0.      0.      0.
   11.61    0.58   5.301   4.300   0.600   0.683  -1.809   0.      0.      0.
          10.039 120.000   8.000  0.       0.402   1.541   0.497    0.615    0.066    0.020          150.000              0.32
           9.678 120.000   8.000  0.       0.319   1.546   0.477    0.       0.748                    10.000              0.26
                    3.00   51.00    153.   0.560   2244.       0.     102.      0.       38.148    38.148
                 3723.   235.40   973.83                    2404.45             0.      3297.36   3297.36    892.91   0.271

IKA TSURI          ｹｲｶｸ
    9.53    0.47   5.482   5.338   0.537   0.631  -0.431   0.      0.      0.
   12.25    0.61   5.042   4.140   0.550   0.621  -2.233   0.      0.      0.
          10.165 120.000   8.000  0.       0.595   1.665   0.510    0.587    0.066    0.030          150.000              0.38
           9.419 120.000   8.000  0.       0.392   1.696   0.467    0.       1.140                    10.000              0.24
                    3.00    5.00     15.   0.517   1140.       0.      10.      0.        5.700     5.700
                 3723.    22.00    60.01                     189.28             0.       218.97    218.97     29.69   0.136

HIKINAWA           ｹｲｶｸ
   10.44    0.52   5.317   4,869   0.543   0.629  -1.086   0.      0.      0.
   12.23    0.61   5.044   4.174   0.554   0.621  -2.582   0.      0.      0.
          12.151 200.000   8.000  0.       0.517   1.692   0.495    0.819    0.066    0.050          250.000              0.33
          10.574 200.000   8.000  0.       0.412   1.700   0.459    0.       0.900                    10.000              0.25
                    3.00   11.00     33.   0.550    330.       0.      22.      0.        9.900     9.900
                 4008.    67.57   186.55                     510.54             0.       665.56    665.56    155.02   0.233

ｹｲﾋ ｺﾞｳｹｲ    3104.27 ﾐｽﾞｱｹﾞ ｺﾞｳｹｲ    4181.89 ﾘｴｷ ｺﾞｳｹｲ      1077.62
```

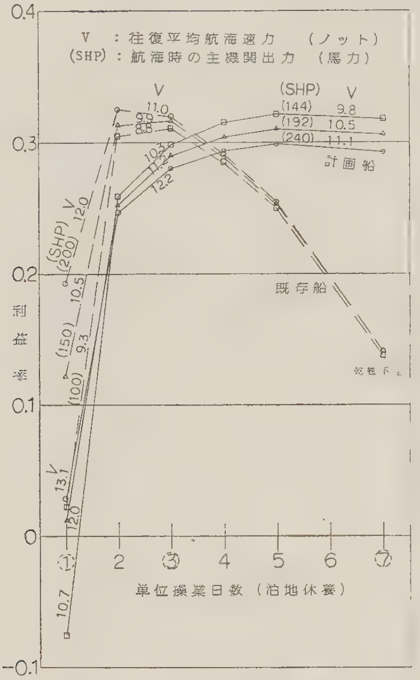


図 2 単位操業日数の影響

Effect of Unit Fishing Days

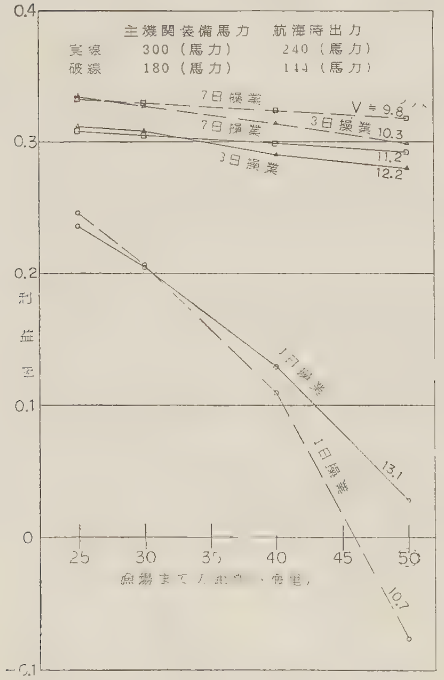


図 3 漁場までの距離の影響

Effect of the Distance from the Base Port to the Fishing Ground

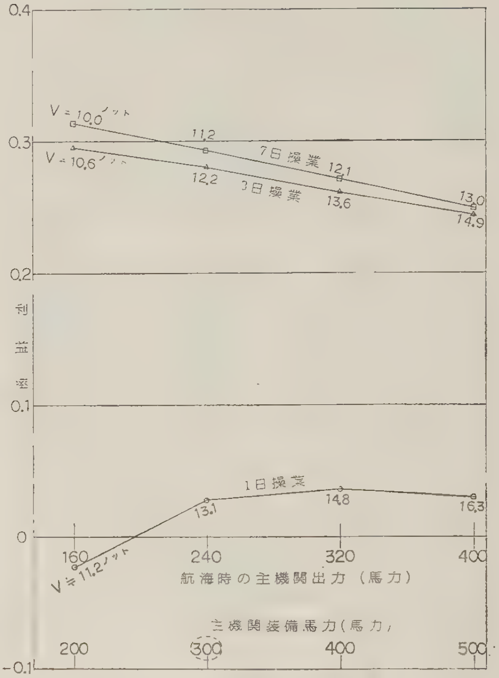


図 4 主機関馬力の影響

Fffect of the Main Engine Power

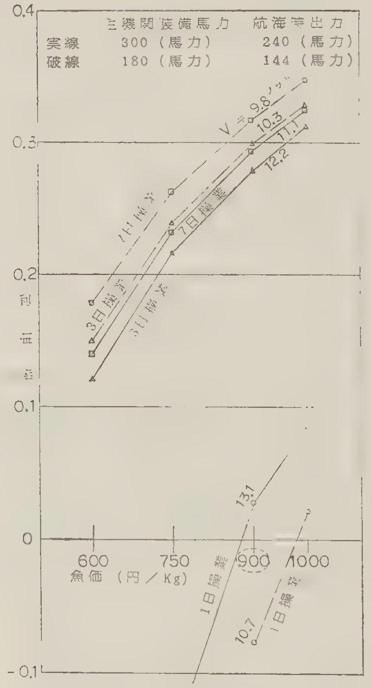


図 5 魚価の影響

Effect of the Fish Price

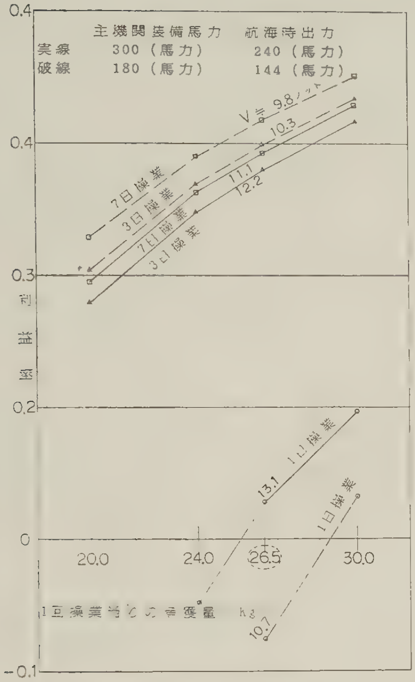


図 6 漁獲量の影響

Effect of the Amount of Unit Catch

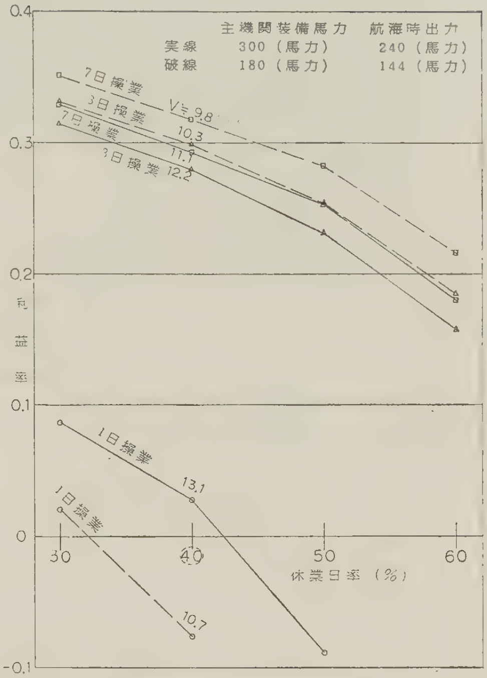


図 8 休業日率の影響

Effect of the Day off Fishing

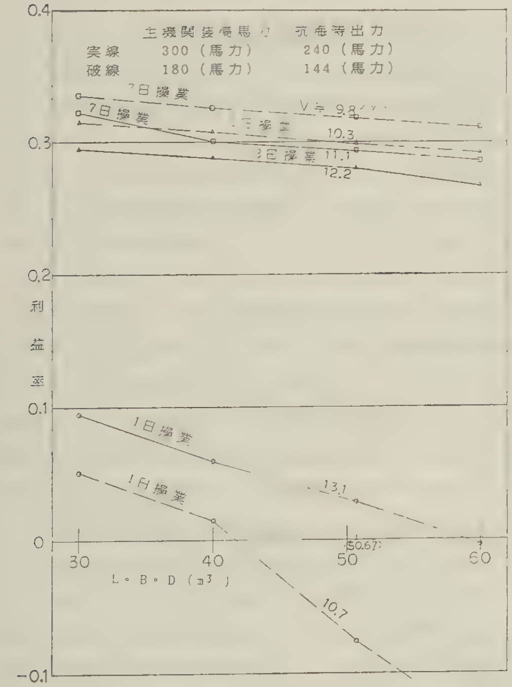


図 7 船規模（L×B×D）の影響

Effect of the Size of Fishing Boat

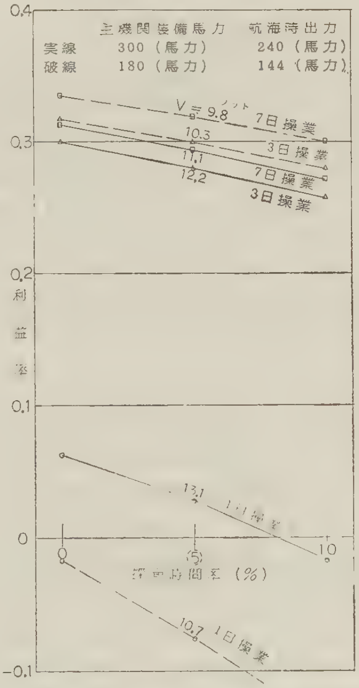


図 9 探魚時間率の影響

Effect of the Fish-Sounding Time on the Fishing Ground

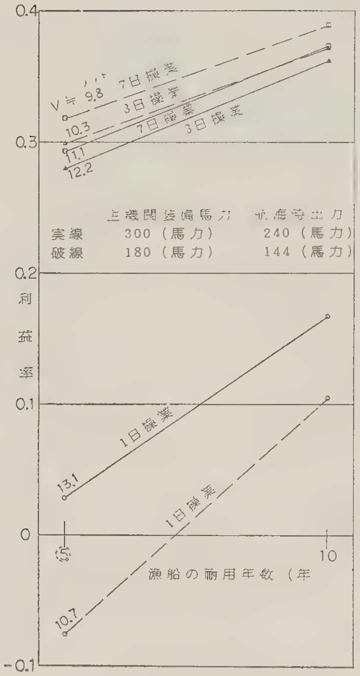


図 10 船の耐用年数の影響
Effect of the Life of Fishing Boat

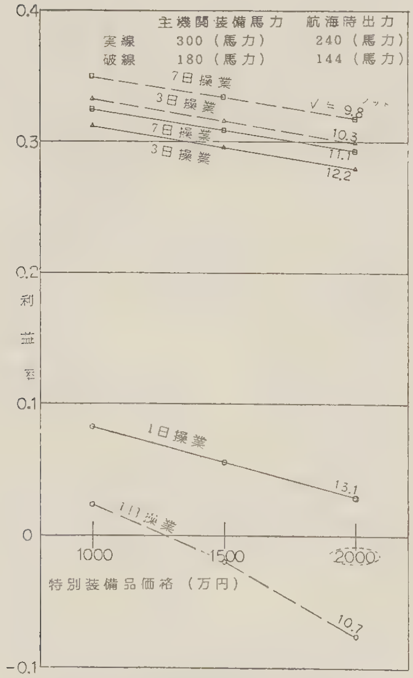


図 11 特別装備品価格の影響
Effect of the Cost of Special Equipment

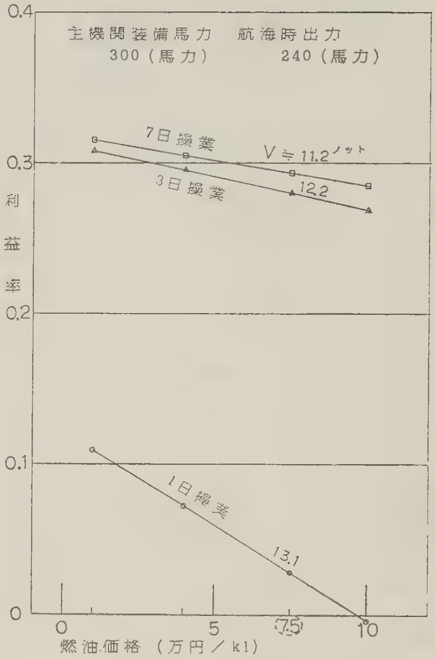


図 12 燃料油価格の影響
Effect of the Price of Fuel Oil

忘れて計算結果のみを決定論的に強調することは厳にさけるべきであり，本プログラム作成の趣旨に反する。本報告の計算例についても同様であり，計算結果の引用には注意を要する。

2） 本プログラムでは，漁業採算性に影響が大きいと見られる魚価，漁獲量，休業日率等の諸数値をインプットする方式になっているので，その数値指定には実態調査解析等による慎重な判断が必要である。

3） 本プログラムの利用に際しては，計画船のモデルとなる類似現存船の造船技術上の詳細な資料のインプットが必要のため，一般の漁業者には利用しにくい難点があるが，もし地域別漁業種類別に標準的なモデル船が選定できるなら，その標準船一隻の調査を造船専門家に依頼し，その資料を有効に利用することによって，その周辺地区，あるいは類似の船規模範囲の計画船のあり方をさぐることが可能と思われる。（2および3の章参照）

4） 本プログラムは全国の沿岸漁船に対し，できるだけ巾広く利用しうるようにした筈であるが，沿岸漁船はバラエティに富むので，いざ実用のインプットをする際にはまだ不十分な点が生ずる可能性がある。しかし，インプットを工夫することによってある程度まではその用途を広げることも可能と思われるので，利用者の工夫を

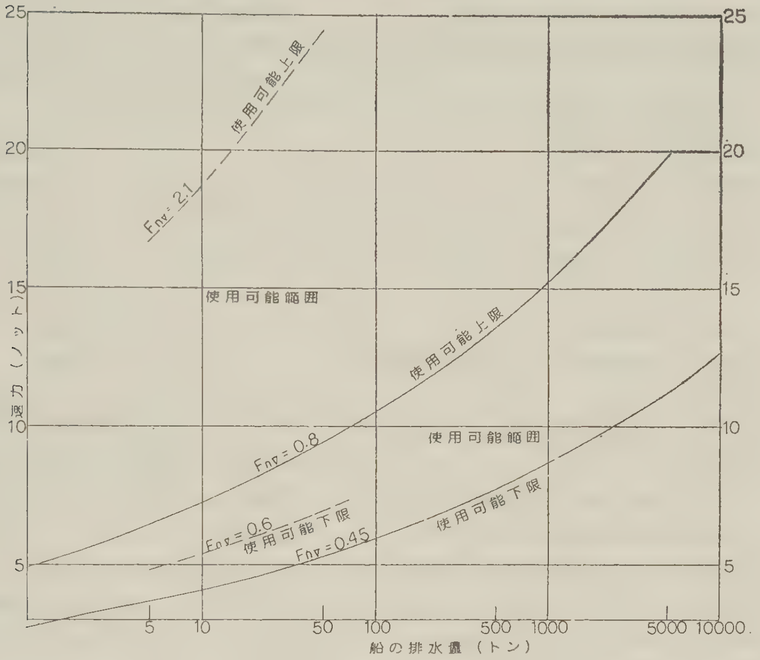


図 13　使用速度範囲

Usable Speed Range of the Fishing Boat Dasign in this Program

期待したい。

5）本プログラムは，比較的軽装備，高速力の沿岸漁船を主対象として作られたため，積荷の変動が極端に大きい漁船や大馬力で曳網する底曳網漁船等に対しては，インプットの数値指定に際して造船技術上の考慮を十分にしないと大きな計算誤差を生ずるおそれがあるので，プログラムの内容をよく理解した上での利用が望ましい。

6）計画船の排水量が大きく，高速力を出し難い沿岸漁船に対しては，その船型を丸型（すなわち排水量型）とするのが得な場合が多いが，その際には計画船の航海速力が，$F_n\nabla=v/\sqrt{\nabla^{1/3}\times 9.8}$（$v$：速力，m/s，$\nabla$：排水容積，$m^3$）の値が0.8未満となることを確認することが必要である。（5.3 参照）それ以上の速力となる場合には，船型として角型（半滑走型）を指定する必要がある。図13に丸型船型の使用可能範囲を実線で，また，参考のため角型船型の使用可能範囲を破線で示す。

7）本プログラムは既報のプログラム（文献28）に沿岸漁船の設計計画用のプログラムを加えてまとめたものとなっており，そのインプット表とアウトプット表の様式は，それに伴って大巾に変更したので注意を要する。アウトプット様式は見易いものとしたが，打ち出しの内容に特に大きな変更はない。

謝　辞

本プログラムは，農林水産省において企画された特別研究「沿岸漁船の操業効率の向上のための最適システム化」の昭和58年度の研究の一環として作成されたものであり，本研究の実施に当り種々ご尽力いただいた農林水産技術会議，水産庁，東京都と神奈川県水産試験場，および当研究所漁船工学部の関係者各位並びに上記研究に関連して(社)漁船協会に設けられた沿岸漁船のトータルシステム研究会[31)]の関係各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

1）小型 FRP 船型用馬力推定図表：(財)日本小型船舶工業会，(財)日本造船技術センター，1977

2）小型 FRP 船型用高速域馬力推定図表：(財)日本小型船舶工業会，1981

3）土屋　孟：漁船の復原性能の理論的解析法について，漁船研究技報，第25巻，1971

4）土屋　孟：漁船船型の有効馬力に関する統計解析とその実用化について，漁船研究報告，第6号，1973

5）世界水産総覧，農林経済研究所，1965

6）薬宅親正：さんま棒受網漁船の適正船価の試算，1969

7）さんま棒受網漁船　報告書，水産庁，1970

8）いか釣漁船の労働の省力化に関する報告書，水産庁，1970

9）葉室親正：まき網漁船省力化研究会報告書（5—10，p.168～186）水産庁，1970.4

10）葉室親正：定置網漁業の労働に関する省力化研究会報告書（4—3—2，p.49～56）水産庁，1972.6

11）小型漁船漁業の総合的省力化研究，石川水試，1971～3

12）かつおまぐろ年鑑，水産新潮社，1971

13）セイロン国における漁業訓練機関に関する調査報告書，JICA，1972

14）葉室親正：カツオ漁船の規模と採算性，水産週報，1972

15）葉室親正：北転船の主機関規模別の漁獲効率と総合的採算性に関する考察，1972

16）葉室親正：漁業経営と水産学，水産資料四季報 Vol. 2，No. 1，1975

17）葉室親正：漁撈面からみた今後の漁船の在り方，日本水産学会漁業懇話会報，No. 13，1979

18）マダガスカル民主共和国水産振興計画基本設計調査報告書，JICA，1980

19）葉室親正：漁業の採算性向上のことども，漁村第46巻第10号，1980

20）葉室親正：漁船漁業の理論的体系づけ，研究ジャーナル Vol. 4，No. 3，1981

21）漁業経営動向等調査（5）　省資源型漁船への移向と問題点，水産庁外，1976

22）土屋　孟：食料政策研究（漁業経営問題特集号）第21号，1980

23）環境適応型漁船開発方策検討事業報告書，(社)漁船協会，1980，1981，1982

24）環境適応型漁船開発方策検討事業シミュレーションプログラム解説書，(社)漁船協会，1982
（内容内訳）
(1) 遠洋まぐろ延縄漁船の適正漁船計画用シミュレーションプログラム
(2) 〃　適正操業計画用　〃
(3) 以西底曳網漁船の　適正漁船計画用　〃
(4) 〃　適正操業計画用　〃
(5) オッタートロール網漁船
(6) 駆廻式1そう曳機船底曳網漁船 ｝の適正漁船計画用〃
(7) オッタートロール網漁船
(8) 駆廻式1そう曳機船底曳網漁船 ｝の適正操業計画用〃

25）仲村典治，葉室親正：環境適応型漁船開発方策検討事業について（その1）適正漁船計画用と適正操業計画用シミュレーションプログラムの開発，漁船第242号，1982

26）葉室親正：同上（その2）各種漁船別適正漁船計画用シミュレーションプログラムについて(1)，漁船第243号，1983

27）仲村典治，葉室親正：同上（その3）同上(2)，漁船　第244号，1983

28）土屋　孟：沿岸漁船の最適操業計画検討用シミュレーションプログラムについて，水産工学研究所報告，第5号，1984

29）鈴木四郎：底魚一本釣漁船の経営合理化の可能性について（操業計画シミュレーション），水産工学研究所技報　漁船工学　第5号，1984

30）沿岸漁船の操業効率の向上のための最適システム化，推進会議資料，水産庁水産工学研究所，1982，1983，1984

31）沿岸漁船の集中制御に関するトータルシステムの開発事業報告書，(社)漁船協会，1982，1983，1984

Simulation Program to Find the Economically Optimum Design of a Coastal Fishing Boat in Japan

By

Tsutomu TSUCHIYA and Shiro SUZUKI

Summary

This paper describes briefly a simulation program designed to find the economically optimum design of a coastal fishing boat, taking into account the fishing operation plan under given fisheries circumstances. Some results calculated by the program are also presented.

The regression equation to estimate the hull resistance (Ref. 1, 2 and 4), and proposed stability criterion for the coastal fishing boat (Ref. 3) are used in the program. The simulation method to estimate the cost and earning of each fishing trip of the deep sea fishing industry presented in Ref. 5~27 is partially used, and the simulation program presented last year to find the optimum operation plan for a coastal fishing boat (Ref. 28 and 29) is also incorporated into this program.

The program is expected to be useful in improving economically the coastal fishing industry in Japan, under the circumstances which are changing remarkably in these days.

水工研報告 6
1985 pp. 205～223

漁船の波浪中の耐航性について（第三報）

—向波中の抵抗増加について—

山越康行*・梅田直哉*・鈴木四郎*

目　次

1.　緒　　言……205
2.　供試船と実験法……206
　2.1　供試漁船について……206
　2.2　波浪中模型実験法について……206
3.　計算法の概略……206
　3.1　船体運動の計算法……206
　3.2　抵抗増加の計算法……207
4.　計算と実験の比較検討……208
　4.1　2次元流体力特性の計算について……208
　4.2　船体運動についての検討……209
　4.3　Surge force についての検討……209
　4.4　向波中抵抗増加についての検討……210
5.　結　　言……210
　参考文献……210
　付　　録……221
　Summary……223

1.　緒　　言

漁船漁業の経営悪化という事態の中で，省エネルギー漁船の開発が注目を浴びるようになって久しい。主として平水中の船体抵抗の軽減や推進効率の向上を図る船型改良についての研究が行われてきている[1)2)3)4)]。その一方，改良船型の安全性を確認するための研究も精力的に実施されている[5)]。しかしここで残る一つの疑問は，改良船が風波の中での動揺により余分なエネルギーを費やして平水中での省エネルギーの成果を無意味にしていないかという点である。すなわち平水中一定速力航行時の所要馬力を軽減することができてもそれを上回る波浪中馬力増加が生じてはもはや省エネルギーということはできない。丸尾[6)]は波浪中抵抗増加が平水中の抵抗特性とは直接的な関係を持たないことを理論的に示している。つまり平水中での省エネルギー船が必ずしも波浪中でも高性能を発揮するわけではないのである。そこで相対的に厳しい海象下で運用される漁船においては平水中のみならず遭遇の予想される波浪中を含めた総合的な推進性能の評価が必要となる。

また波浪中の馬力増加といっても，波浪中抵抗増加，推進効率の変化やオートパイロットによる自励発振等多くの要素が関係すると考えられている。ここではその第一歩として最も重要と思われる波浪中抵抗増加について取り扱うこととした。なかでも斜波や追波に比べて特に厳しい向波の場合に着目する。漁船の波浪中抵抗増加についての研究は少なく，わずかに高橋・田中[2)]が旋網漁船について実験と計算の比較を行った例があるほか，漁船研究室における実験例がいくつかみられる程度である[22)23)24)25)]。船型改良にあたっては実験によらない実用推定法の確立が必要となるが，抵抗増加の理論計算が実用に耐えるか否かは船型により異なるといわれる。商船同様漁船についても理論，実験による比較検討が急務といえる。

著者らは先に漁船の耐航性研究の一環として，ストリップ法の漁船への適用とその検証を行ってきた[7)8)]。そこでは O.S.M[9)]による計算が向波中の水槽実験結果をほぼ説明することを明らかにした。この事実に基づき，波浪中抵抗増加についてもストリップ法の考え方によって取り扱うこととする[10)11)]。抵抗増加はストリップ法によって得られた船体運動をもとに波のエネルギー関係式から計算される。ただ抵抗増加は波高に対して高次の流体現象であるため，複雑な漁船船型を正確に考慮し，予めストリップ法の精度を高めておく必要がある。そこで2次元流体力は特異点分布法[12)]により求め，運動方程式には end effect を含めた。これによりハードチャイン・トランサムスターン船型の沿岸小型漁船についても計算が可能となった。これらのストリップ法の改良と抵抗増

---

* 漁船工学部

加について，理論と実験の比較という立場から検討した結果を以下報告する。

2.　供試船と実験法

2.1　供試漁船について

供試船としては，3隻の漁船を選んだ。一つは265GT型カツオ釣漁船で以後A船とする。これは実存船で土屋の統計解析法1)により設計されたいわゆる省エネルギー漁船である。B船は，1030GT型旋網漁船である。以上2隻はラウンドチャイン船型で船首バルブはなく，クルーザースターンを持っている。これに対してハードチャイン・トランサムスターン船型として，8.5GT型一本釣漁船をC船として選んだ。これもまた小型FRP漁船用有効馬力推定式による省エネルギー船と称されるものである。各々の主要目を表1に，線図を図1～3に示す。

2.2　波浪中模型実験法について

A．B両船についての水槽実験結果は第1，2報7)8)に報告されている。ここでは抵抗増加についての計算値との比較を行うことを主目的としているのでその実験の詳細は省略する。そこでの方法は surge, heave, pitch を free, sway, yaw, roll を fix したうえで自航させるものである。計測量としては，heave, pitch の運動とトルク，スラスト等である。

C船については今回新たに水槽実験を実施した。そこでの方法は，heave, pitch のみ free とし，surge も fix としたものである。模型船は重心にある pitch 回転部において曳航される。その曳引力は歪ゲージ式検力計により計測され，前後力となる。この力は水平方向のもので，船長方向のものではない。heave, pitch についてはポテンショメーターにて，波高は曳引車上の容量式波高計により検出した。これらの計測信号はすべてA-D変換後フーリエ解析により，定常成分と基本周波数成分の振幅，位相に分離した。その前後力の定常成分と平水中の抵抗の差を波浪中抵抗増加として取り扱えるものとした。

このような曳航実験法をとる場合，船の排水量には heaving rod の重量も含まれるが慣性モーメントには寄与しないといった点に注意する必要がある。なぜなら pitch 回転機構は pin joint と考えられるから，力は伝えるがモーメントは伝達しないためである。

3.　計算法の概略

3.1　船体運動の計算法

ここでは今回の計算に用いた方法の概略を示す。座標系として，図4のように船体中央を原点とする，Z軸下向きの右手系を考える。船は，一定速度Vをもち，円周波数 ω の入射波 ζ_w を受けて heave（ζ），pitch（θ），surge（ξ）を行うとする。

$$\zeta_w=h_0\cos(kx\cos\chi-ky\sin\chi-\omega_e t) \tag{1}$$

$$\omega_e=\omega-kV\cos\chi \tag{2}$$

$$k=\omega^2/g \tag{3}$$

$$\left.\begin{aligned}\zeta&=\zeta_a\cos(\omega_e t-\varepsilon_\zeta)\\ \theta&=\theta_a\cos(\omega_e t-\varepsilon_\theta)\\ \xi&=\xi_a\cos(\omega_e t-\varepsilon_\xi)\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

なお ε_ζ，ε_θ，ε_ξ は，波の谷が船体中央をよぎるときからの遅れを正とする位相差であり，χは波と船の出会い角である。

船体運動を計算するにあたってはストリップ法に従う。ストリップ法の仮定はよく知られている通り，次のように列記できる。

一船体は十分細長い

一船と波の出会い周波数は高い。

一海洋波の波高波長比は十分小さく，波長船長比は小さくない。

比較的長い波長で微小波高の向波中をある程度の速度で航行する場合が最もこの仮定に一致するところである。

実用化されたストリップ法として我が国では O.S.M.（Ordinary Strip Method）が広く普及しており，第1報7)，第2報8)においてもこの方法によっていた。その運動方程式は，渡辺が運動量解析により導いたものである。またそこで必要となる2次元流体力特性は Ursell-田才法により求められる。しかし O.S.M. は Timman-Newman の対称関係13)を満たしていないといった問題点がある。（付録参照）これについて高木9)はより合理的な立場からストリップ法を修正した。この方法が N.S.M.（New Strip Method）である。今回は O.S.M. と N.S.M. の両方で計算を行いその違いについても検討を行った。

N.S.M. においては，y z 平面における流体の2次元速度ポテンシャルを考える。

$$\phi=(-\dot{\zeta}+x\dot{\theta}-V\theta+\dot{\zeta}_w)(\varphi_c+i\varphi_s) \tag{5}$$

このうち $\varphi_c+i\varphi_s$ は単位振幅で heaving を行う2次元柱体まわりの速度ポテンシャルである。速度ポテンシャルより圧力は次のように与えられる。

$$p=-\rho\left(\frac{\partial}{\partial t}-V\frac{\partial}{\partial x}\right)\phi+\rho gz \qquad (6)$$

この圧力を船体表面上で積分することにより，船に働く流体力を求めることができる。

波浪中の船体運動の方程式は次のように書けるものとする。

$$(M+A_{33})\ddot{\zeta}+B_{33}\dot{\zeta}+C_{33}\zeta+A_{35}\ddot{\theta}+B_{35}\dot{\theta}+C_{35}\theta =F_{zc}\cos\omega_e t+F_{zs}\sin\omega_e t \qquad (7)$$

$$(I_y+A_{55})\ddot{\theta}+B_{55}\dot{\theta}+C_{55}\theta+A_{53}\ddot{\zeta}+B_{53}\dot{\zeta}+C_{53}\zeta =M_{yc}\cos\omega_e t+M_{ys}\sin\omega_e t \qquad (8)$$

$$(M+A_{11})\ddot{\xi}+B_{11}\dot{\xi}+C_{11}\xi=F_{xc}\cos\omega_e t+F_{xs}\sin\omega_e t \qquad (9)$$

ここで M, I_y は船の質量，y 軸まわりの慣性モーメントであり，surge については船の細長性より他のモードとの連成は無視できると考えている。また各係数については O.S.M, N.S.M. のそれぞれについて付録に示した。そこには船長についての積分による項のほかに，船首尾端での値の差による項が含まれている。この項はいわゆる end effect であり，通常型船舶においてはその寄与は小さいとして無視されることも多い。しかし小型漁船に多いトランサムスターンの場合は少なからぬ影響があるものと思われる。そこで本論においてはこの end effect も考察の対象とした。

運動方程式の係数には，2次元流体力特性として，ρN_z, ρS_z の2つが含まれている。これらは2次元造波理論による計算から求められる。2次元流体力計算法としては，Ursell-田才法や特異点分布法がよく用いられる。Ursell-田才法[14]は円からの等角写像によっており，ハードチャインのような鋭い edge をもつ船型についての適用は難しい。一方特異点分布法は船型を忠実に考慮できる利点をもつが計算時間の増加といった欠点も伴う。本報においては，これら2つの計算法の違いが船体運動，抵抗増加の計算に与える影響を調査するため，2つの方法を並行して用いた。Ursell-田才法については第1，2報と同じく，Lewis form についての数表[9]を利用した。特異点分布法はその物体形状をそのまま用いるという点で数表の利用にはなじまない。そこで直接この計算をプログラム中に組み込んだ。その解法は2次元 Green 関数Gの導入により船体表面についての次の積分方程式に帰着する。

$$v_n=\pi(\sigma_c+i\sigma_s)+\int_c(\sigma_c+i\sigma_s)\frac{\partial G}{\partial n}ds \qquad (10)$$

$$G=\log\sqrt{(y-y')^2+(z-z')^2} -\log\sqrt{(y-y')^2+(z+z')^2} -2\lim_{\mu\to 0}\int_0^\infty\frac{e^{-u(z+z')}\cos u(y-y')}{u-K+i\mu}du \qquad (11)$$

ただし $\sigma_c+i\sigma_s$ は吹き出し分布，n は船体表面上外向き法線，v_n はその方向の流速，C は船体表面を表わす。なお2次元流体力特性は次のように無次元化して以後取り扱う。

$$\bar{A}_H=\sqrt{\frac{\omega^3}{\rho g^2}\rho N_z} \qquad (12)$$

$$C_0K_4=\frac{\rho S_z}{\frac{1}{2}\rho\pi(B/2)^2} \qquad (13)$$

ただしBは船体断面の幅である。

3.2　抵抗増加の計算法

次に波浪中抵抗増加の計算法について考える。丸尾[6]はエネルギー論的考察により抵抗増加の理論計算式を導いた。それは線型理論の範囲内で最終的な厳密解と考えられている。

$$\Delta R=\frac{\rho}{4\pi}\left[-\int_{-\infty}^{m1}+\int_{m2}^{m3}+\int_{m4}^{\infty}\right]|H(m)|^2 \frac{\left(m+\frac{\omega_e}{V}\right)^2(m-K\cos\chi)}{\sqrt{\left(m+\frac{\omega_e}{V}\right)^4-K_0{}^2m^2}}dm \qquad (14)$$

$$K=\frac{\omega^2}{g}\quad K_0=\frac{g}{U^2}\quad \Omega=\frac{U\omega_e}{g}$$

$$\left.\begin{matrix}m_1\\ m_2\end{matrix}\right\}=-\frac{K_0}{2}[1+2\Omega\pm\sqrt{1+4\Omega}]$$

$$\left.\begin{matrix}m_3\\ m_4\end{matrix}\right\}=\frac{K_0}{2}[1-2\Omega\mp\sqrt{1+4\Omega}]$$

$H(m)$ は船の作る進行波に関係し Kochin 関数と呼ばれ，船体を表わす特異点分布により決まる。丸尾の理論は3次元波動の速度ポテンシャルを用いているため，この特異点分布も3次元 Green 関数を用いた解法により定めておく必要がある。しかし現実には3次元解法を前進速度をもった場合について適用することは極めて困難である。そこでストリップ法の適用可能な周波数域について $H(m)$ を2次元流体力計算から求めることが通常行われる。ところが N.S.M. の考え方に立てば，そのような条件下では流場自体も2次元的な取り扱いが可能と考えられる。すなわち丸尾の理論式に相当するストリップ法的な抵抗増加公式が存在することとなる。

Gerritsma-Beukelman[10]はそのような意味での公式を発表した。

$$\Delta R=\frac{K}{2\omega_e}\int\left(N_z-V\frac{\partial S_z}{\partial x}\right)|V_r|^2dx \qquad (15)$$

$$V_r=-\dot{\zeta}+x\dot{\theta}-V\theta+\dot{\zeta}_w$$

これに対して高木，細田，肥後11)はストリップ法的な検査面を明示したうえでエネルギー論的考察を行いやはり抵抗増加公式を与えた。

$$\Delta R=\frac{K}{2\omega_e}\int N_z|V_r|^2dx \qquad (16)$$

ここでは高木らの解析の概要について触れておく。エネルギー論的考察のための検査面を図5のようにおく。このうち S_S は船体表面，S_F は自由表面，S_{x+}，S_{x-}，S_{y+}，S_{y-} は無限遠の検査面を表わす。ここでの流体のエネルギー E の変化は次の通りとなる。

$$\frac{dE}{dt}=-\rho\iint_S\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial t}\ \frac{\partial\Phi}{\partial n}-\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}+\frac{p}{\rho}\right)v_n\right\}dS \qquad (17)$$

ただし Φ は速度ポテンシャル，n は検査面の内向き法線，v_n は検査面の移動速度である。まず船体の時間的平均位置に固定された等速移動座標系を考える。このときの検査面を通してのエネルギー変化は次式で与えられる。（ここでの速度ポテンシャルは一様流の存在を含んでいる。）

$$\frac{dE}{dt}=\iint_{S_S}p\ \frac{\partial\Phi}{\partial n}dS-\rho\iint_{S_{x\pm}+S_{y\pm}}\frac{\partial\Phi}{\partial t}\ \frac{\partial\Phi}{\partial n}dS \qquad (18)$$

ここで第1項は船体が流体に対してなす仕事であり，その時間平均は零であるから，

$$\overline{\iint_{S_{x\pm}+S_{y\pm}}\frac{\partial\Phi}{\partial t}\ \frac{\partial\Phi}{\partial n}dS}=0 \qquad (19)$$

次に空間固定座標系で考える。ここでは速度ポテンシャルは一様流を含まず ϕ とする。このときのエネルギー変化 $\frac{dE}{dt}$ は船が流体に対してなす仕事 ΔRV である。

$$\Delta RV=\rho\iint_{S_{x\pm}+S_{y\pm}}\overline{\left\{\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}-V\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial\phi}{\partial n}-Vn_x\right)-\frac{p}{\rho}Vn_x\right\}}dS \qquad (20)$$

ただし n_x は法線ベクトル n の x 方向成分である。ここで(19)式を用いて，

$$\Delta R=\rho\iint_{S_{x\pm}+S_{y\pm}}\overline{\left\{-\frac{\partial\phi}{\partial x}\left(\frac{\partial\phi}{\partial n}-Vn_x\right)-\frac{p}{\rho}\right\}}dS \qquad (21)$$

これにより抵抗増加を実際に計算するには $S_{x\pm}$，$S_{y\pm}$ 上での ϕ を知る必要がある。ストリップ法の流場を仮定するとそれは次のように与えられる。

$$\phi=R_e\left\{\frac{gh_0^{\pm}}{i\omega}exp\left[-kz+i(kx+\omega_et)\right]\right\}$$
$$\text{on } x=\pm\infty \qquad (22)$$

$$\phi=R_e\left\{\frac{gh_0}{i\omega}exp\left[-kz+i(kx+\omega_et)\right]\right\}$$
$$+\frac{|V_r|g}{\omega_e^2}\bar{A}_HR_e\left\{exp\left[-kz+i\left(\omega_et-\frac{\omega_e^2}{g}y-\varepsilon\right)\right]\right\}$$
$$\text{on } y=\infty \qquad (23)$$

これらを(19)，(21)式に代入して演算を行うと(16)式が導びかれる。このようにして Gerritsma-Beukelman の(15)式中の S_z についての項は不要であるとの結果に至る。この誘導過程より波浪中抵抗増加は，船の heaving, pitching による横方向への進行波に持ち去られるエネルギー損失に基づくものと理解できる。高木らの研究に先立ち，丸尾，石井15)は(14)式をストリップ法の仮定のもとで簡単化し同等な式を導いている。

本論においてはストリップ法の仮定のもとで首尾一貫した計算を行うという観点から，付加質量の項を含めない Gerritsma-Beukelman の式(16)を用いて波浪中抵抗増加を求めた。なお抵抗増加の無次元表示は次の通りとしている。

$$K_{Aw}=\frac{\Delta R}{\rho gh_0^2(B^2/L)} \qquad (24)$$

4.　計算と実験の比較検討

4.1　2次元流体力特性の計算について

この章では計算と実験の比較を行うがその準備として2次元流体力特性の計算結果をまず検討する。具体的には Lewis form を用いた Ursell-田才法と特異点分布法の比較計算を行った。

初めに Lewis form による船体近似の有効性を調べるため，ハードチャイン船型のC船の A.P., S.S.1, S.S 8断面での近似度を図6に示す。A.P. 断面は短形に近い形である。Lewis form は bilge の鋭い角を表現できていないが原船型との差はそれほど大きくない。次に S.S. 1断面は先の短形の下に薄いスケグが付いた形である。この場合 Lewis form は幅，喫水，面積こそ等しいものの助骨線形状は全く表現できていないと判断できる。S.S. 8 断面は三角形断面に近いが Lewis form によりよく表現されている。

図7は同じC船について $\bar{A}_H$，C_0K_4 の船長方向分布を示すものである。Lewis form による Ursell-田才法は，S.S. 1～7 に至る断面で，特異点分布法と若干異な

る結果となっている。これはほぼスケグの存在する範囲と等しい。すなわち S.S.1 断面のようにスケグによりLewis form の近似度が劣化するためと考えられる。しかし注目すべきことは，忠実に船型を表現する特異点分布法において，スケグを含む断面と含まない船尾断面との流体力の差が現われていない点である。

図8は特異点分布法によるS.S.1断面の船体表面上吹き出し分布である。これよりわかるように，スケグ上での吹き出し強さは主船体のそれに比べて極めて小さい。このため heave におよぼすスケグの影響はこの船型の場合無視できることになる。図7で特異点分布法によるスケグの影響が現われなかったことはこのためであろう。Lewis form の場合はスケグの影響を断面全体の変化として取り入れるためむしろ誤差を広げる結果となったようである。また吹き出し分布が鋭い bilge 付近で正負逆に発散する傾向を示す様相は，大川[16]により指摘された短形浮体特有のものに共通する。写像関数の項を増やせば Ursell-田才法によっても任意形状が取り扱えると考えられるが，この bilge での現象は特異点分布法によってのみ表現されるところであろう。

以上のような検討の結果，2次元特性の計算は特異点分布法が汎用性を持つものと判断される。Ursell-田才法の場合は，スケグを除外して適用するなど船型に応じた配慮が必要である。ハードチャイン船型の漁船のheave についての両者の差は2次元付加質量で10%程度であった。この違いが有意か否かは次節以下で船体運動，抵抗増加といった形で検討した。

4.2 船体運動についての検討

3章で示されたようにストリップ法と一口にいってもその計算法は一つではない。2次元計算法にどのようなものを用いるか，end effect は考えるのかといった点や，O.S.M.，N.S.M.，S.T.F.M. 等のうちいずれを選択するかといった問題が残っている。これらに対しては計算法の相互比較を行ったうえで実験との照合により優劣を考えるのが工学的手法といえよう。本報ではこの手法を適用するため，次のような計算法を取りあげた。

—O.S.M.（end effect 無）＋Ursell-田才法
—O.S.M.（end effect 無）＋特異点分布法
—O.S.M.（end effect 有）＋特異点分布法
—N.S.M.（end effect 有）＋特異点分布法

なお，A船については第1報で，B船については第2報で船体運動の計算と実験の比較をそれぞれ報告している。そこでは O.S.M.（end effect 無）＋Ursell-田才法が用いられ良好な結果が得られている。今回は最も計算法による違いが表われると考えられるC船を対象船として選んだ。

まず2次元特異点分布法と Ursell-田才法の比較を行う。2次元特性 $\bar{A}_H$，C_0K_4 としての比較は既に示したところである。ここではそれを用いて heave，pitch の船体運動という形で比較し，図9〜12に示す。横軸は$\sqrt{L/\lambda}$で波周波数に対応し（L：船長，λ：波長），縦軸は ζ_a/h_0，θ/kh_0 といった heave, pitch の無次元表示を示している。O.S.M. で end effect 無という条件下で2つの2次元流体力計算法による結果の違いが実線と破線として現われる。$F_n=0.0$ では両者の差はほとんどみられないが，$F_n=0.4$ になると heave, pitch ともやや差が現われている。特異点分布法が船体表示のうえから合理的であるのは明らかであり，以後同法を用いて検討を続ける。

次に end effect について考える。end effect は付録にみられるようにすべて前進速度に関係する項である。船首バルブのないC船の場合，end effect はトランサムスターンの効果に相当する。図13〜16は，O.S.M.＋特異点分布法という条件下で end effect の有無の差を示すものである。その結果は heave, pitch いずれの場合も比較的大きな差が現われている。C船のようなトランサムスターン船型ではこの end effect は無視できないと考えられる。

N.S.M. は O.S.M. に比べて理論的に整っておりその優位性をもつと考えられる。そのためいままでの検討で明らかになった特異点分布法，end effect を N.S.M. に加えた計算が最も合理性をもつと予想される。ここでは次にこの N.S.M.（end effect 有）＋特異点分布法の計算と第1，2報で用いた O.S.M.（end effect 無）＋Ursell-田才法の計算および水槽実験結果の相互比較を行い，図17〜24に示す。2つの計算法の差は $F_n=0.0$ では小さいが，$F_n=0.4$，0.475 では振幅，位相とも大きくなる。実験結果はいずれの計算法に対しても比較的良く一致している。しかし $F_n=0.4$，0.475 の pitch の振幅で顕著なように，N.S.M.（end effect 有）＋特異点分布法がよりよい推定精度をもつと判断される。ただ位相差については振幅ほどのよい一致はいずれの計算によっても現われない。このことはストリップ法自体が流場の複雑さに対し不充分であることをうかがわせる。三次元影響，前進速度影響，非線型影響を含んだ理論の導入と流体力，圧力段階での実験との比較が今後の課題であろう。

4.3 Surge Force についての検討

C船の実験では Surge を固定して Surge force を計

測した。これをストリップ法の計算結果と比較し図25に示す。縦軸は surge force の無次元化で次のように表わされる。

$$C_s=\frac{F_x}{\rho g h_0 L^2} \qquad (25)$$

ストリップ法においては，船の細長性より diffraction force は高次であるとみなし，Froude-Krylov force のみを考慮している。このため船速の影響は現われない。

$F_n=0$ の場合，計算と実験の一致度は良好である。しかし実験値には船速影響が明らかに存在し，高速域では計算と一致しなくなる。6自由度拘束での小保方他17)，小林18)の計測例とは異なる傾向にあり，今後 surge と heave, pitch との連成も含めて再検討すべきものと思われる。

4.4　向波中抵抗増加についての検討

向波中抵抗増加について，A船，B船，C船に対して実験と計算の比較を行い図26～29に示す。ただしA船，B船の実験は推力増加を計測したものであるため，推力減少係数 $t=0.1$ として次のように換算した。

$$\Delta R=(1-t)\Delta T=0.9\Delta T \qquad (26)$$

A，B両船の実験値はばらつきが多いものの全体として Gerritsma-Beukelman の式による計算値とよく一致していると考えられる。なおここでの運動計算には O.S.M.（end effect 無）＋Ursell-田才法を用いている。この結果より通常のラウンドチャイン漁船船型では，波浪中抵抗増加がほぼ radiation wave と diffraction wave により遠方へ持ち去られるエネルギー損失に等しいものと考えられる。これはコンテナ船などと共通する結果である。

一方C船の実験値は計算値の数倍と過大である。しかし波長ベースの傾向は類似性がみられる。ここでの運動計算には先の検討により，N.S.M.（end effect 有）＋特異点分布法を用いている。今回の実験と計算の不一致の原因は，大きく2つが考えられよう。1つは造波により持ち去られるエネルギーの計算法の精度不足であり，丸尾の厳密解と細長体理論の導入や非定常波形解析により確認されるべきものである。もう1つは別の抵抗増加成分の存在の可能性である。実験時C船の船首船底部は露出，着水を繰り返しており，その船首形状の影響もあって前方へ spray を飛ばすことが観察された。このような spray の波浪中抵抗増加への影響についても検討すべきと考える。なお新谷ら19)，別所ら20)はC船に近い船型の護衛艦，高速艇の計測例を示している。そこでもK_{AW}－4.0～5.0とコンテナ船などに比べ大きく，特殊性がうかがえる。

以上の検討の結果，通常型漁船については抵抗増加の理論推定が十分可能と思われる。したがって，今後同推定法による船型計画への応用が期待できる。またハードチャイン・トランサムスターン型漁船については今後の研究上の問題提起がなされたものと考える。

5.　結　　言

向波中の抵抗増加推定の準備として，heave, pitch についてのストリップ法と実験の比較をハードチャイン・トランサムスターン型の小型漁船について実施した。その結果，end effect を含む N.S.M. で特異点分布法を用いた計算値は実験値と良い一致を示すことが明らかになった。しかし end effect を含まない O.S.M. で Lewis form による Ursell-田才法を用いたもので実用上十分な推定精度と考えられる。

次に付加質量項を含まない Gerritsma-Beukelman の公式により向波中の抵抗増加を計算し，実験との比較を行った。その結果，ラウンドチャイン型のかつお釣漁船，旋網漁船について両者はほぼ一致することまたハードチャイン型小型漁船の実験値が過大となること等明らかにされた。

今後波浪中馬力増加の検討を種々の漁船について行い資料の蓄積を図るとともに，船型改良手法に組み込んで総合的な推進性能設計を図ることが必要であると考える。

本報告について，大阪大学内藤林講師，防衛庁技術研究本部第1研究所新谷厚博士，三井造船昭島研究所小林正典博士ならびに船舶技術研究所大川豊技官より，貴重な御助言御教示を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。また数値計算にあたっては農林水産研究計算センター ACOS 850 を使用したことを付記する。

参考文献

1)　土屋　孟：漁船船型の有効馬力に関する統計解析，日本造船学会論文集，第132号，1972

2)　高橋洋二，田中満佐人：省エネルギ漁船船型の開発，石川島播磨技報，第18巻第3号，1978

3)　萩原誠功，他：省エネルギ形まぐろ延縄漁船の開発，石川島播磨技報，第21巻第1号，1981

4)　Lamb, T： Measuring Fishing Vessel Energy Performance and Ways to Improve It, Fishing Industry Energy Conservation Conference, Seattle, 1981

5） 土屋　孟：漁船の復原性，第2回耐航性シンポジウム，1977

6） 丸尾　孟：波浪中の船体抵抗増加に関する研究（第2報），造船協会論文集，第108号，1959

7） 山越康行，他：漁船の波浪中の耐航性について（第1報），漁船研究技報，第28巻第63号，1975

8） 山越康行・鈴木四郎：漁船の波浪中の耐航性について（第2報），水産工学研究所報告，第1号，1980

9） 田才福造・高木又男：規則波中の応答理論及び計算法，第1回耐航性シンポジウム，1969

10） J. Gerritsma & W. Beukelman: Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship, I.S.P., Vol. 19, No. 217, 1972

11） 高木又男，他：抵抗増加に関する Gerritsma 公式のエネルギー論的考察，関西造船協会誌，第170号，1978

12） 前田久明：任意船型に及ぼす波の強制力について，日本造船学会論文集，第126号，1969

13） R. Timman & J. N. Newman: The coupled damping coefficient of a symmetric ship, J.S.R., Vol. 5, No. 4, 1962

14） 田才福造：船の上下動揺ならびに縦動揺における減衰力及び附加質量について，造船協会論文集，第105号，1959

15） 丸尾　孟・石井昭良：簡易化公式による向い波中抵抗増加の計算，日本造船学会論文集，第140号，1976

16） 大川　豊：浮体に作用する流体力について（その1），船舶技術研究所講演梗概，第22号，1973

17） 小保方準，他：斜波中の船体に対する波浪強制力について，日本造船学会論文集，第132号，1972

18） 小林正典：前進速度を有する任意形状の3次元物体に働く流体力について，日本造船学会論文集，第150号，1981

19） 新谷　厚・中原一基：護衛艦船型の波浪中抵抗増加について，防衛庁技術研究本部技報，第760号，1979

20） 別所正利，他：高速艇の規則波中縦運動の研究，日本造船学会論文集，第135号，1974

21） 高石敬史・黒井昌明：波浪中船体運動の実用計算法，第2回耐航性シンポジウム，1977

22） 横山信立，他：木造トロール漁船の波浪中の自航試験，漁船研究技報，第14号，1960

23） 小林　務：木造トロール漁船の波浪中自航試験（その2），漁船研究技報，第18巻第6号，1964

24） 小林　務：和船型漁船の推進性能並びに耐航性能に関する水槽試験成績について，漁船研究技報，第21巻第4号，1967

25） 小林　務，他：搭載漁艇の船型に関する研究，漁船研究技報，第24巻第4号，1970

表 1　供試船の主要目等

Principal dimensions of each ship

	A		B		C	
	MODEL	SHIP	MODEL	SHIP	MODEL	SHIP
L_{PP} (m)	2.00	39.2	2.32	58.0	2.32	14.30
B (m)	0.398	7.80	0.474	11.85	0.46	2.83
D (m)	0.176	3.45	0.212	5.30	0.174	1.07
Δ (kg) (ton)	96.92	748.0	80.36	1287.	55.7	13.37
$d_{\otimes}$ (m)	0.180	3.52	0.146	3.64	0.071	0.44
$Trim$ (m)	0.070	1.37	0.047	1.17	0.062	0.38
$\otimes G/L$	− 0.048	− 0.048	− 0.02	− 0.02	− 0.132	− 0.132
K_{YY}/L	0.232	0.232	0.261	0.261	0.319	0.319
縮　　率	1/19.6		1/25.0		1/6.16	

（注） $\otimes G/L$ の符号（−）は$\otimes$より後方を示す

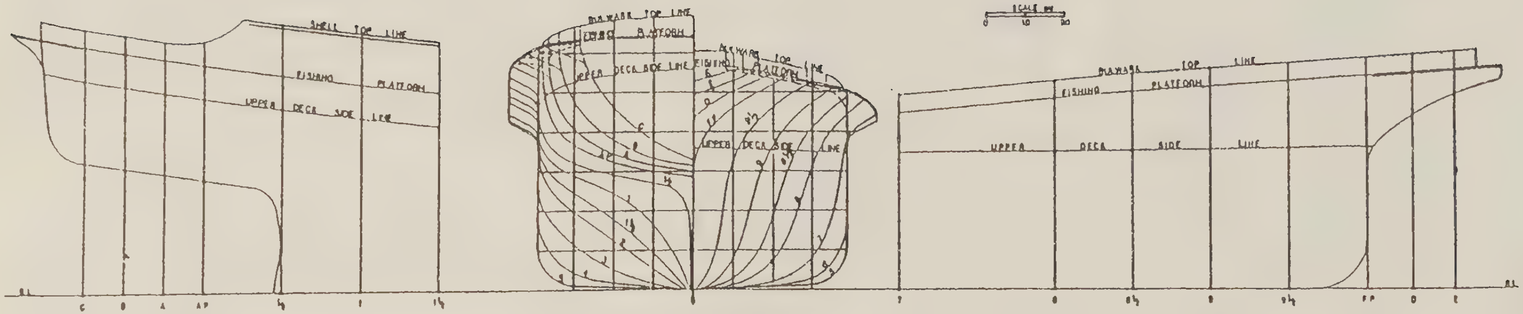

SHELL TOP LINE
FISHING PLATFORM
UPPER DECK SIDE LINE
BULWARK TOP LINE
SCALE
BL
AP
FP

図1 A 船 の 線 図
Lines of model A

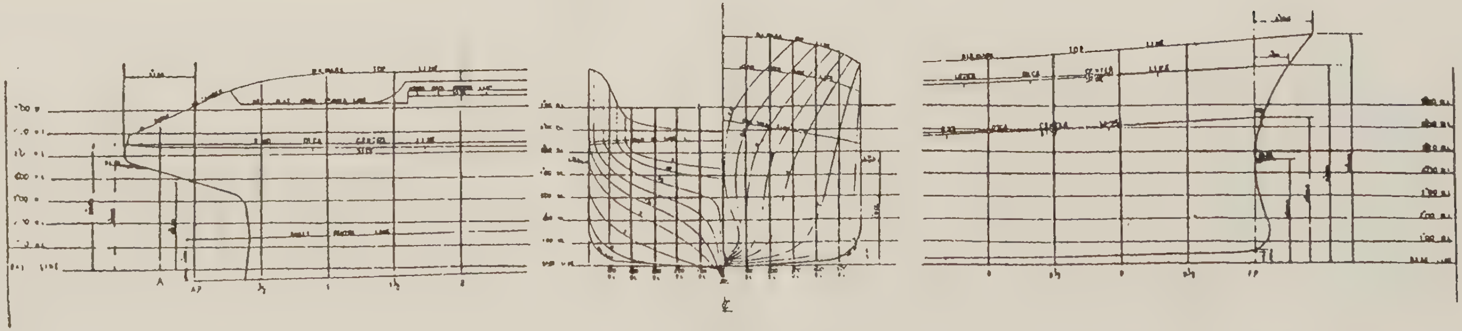

BULWARK TOP LINE
UPPER DECK SIDE LINE
A
AP
FP
℄

図2 B 船 の 線 図
Lines of model B

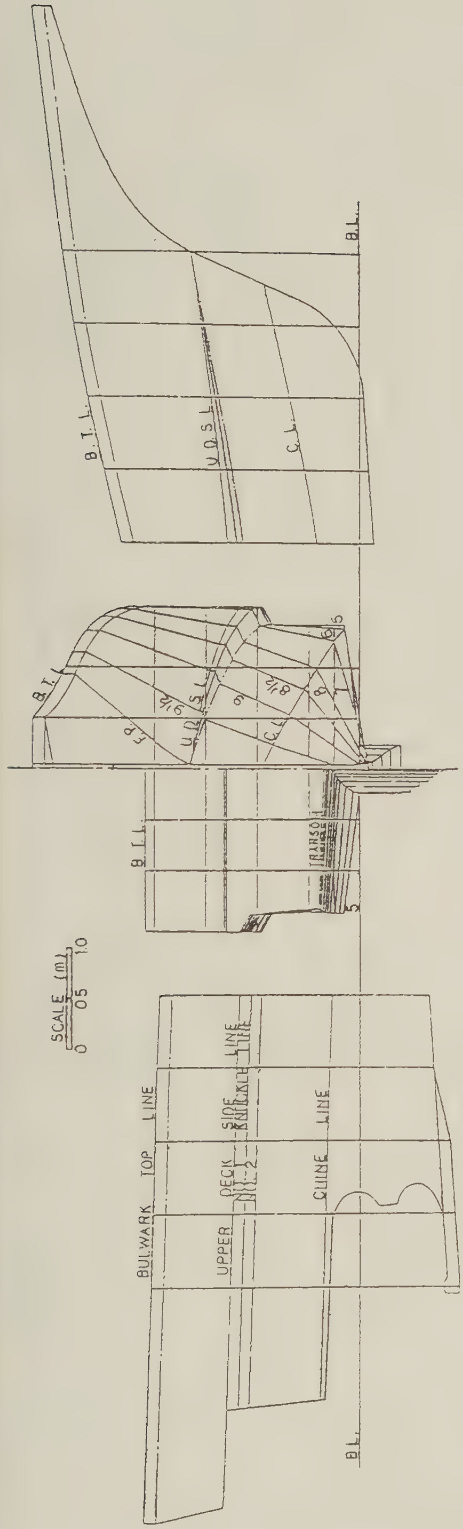

B.L.
B.T.L.
U.D.S.L.
C.L.
F.P.
9½
9
8½
8
7
6
5
TRANSOM
SCALE (m)
0
0.5
1.0
BULWARK TOP LINE
UPPER DECK SIDE LINE
KNUCKLE LINE
CHINE LINE
KN-1
KN-2

図 3 C 船 の 線 図
Lines of model C

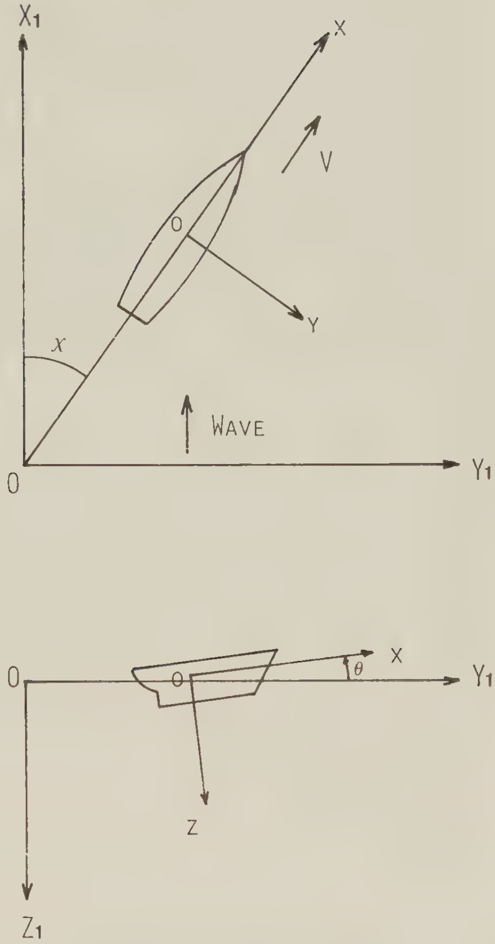

X1
X
V
O
Y
χ
WAVE
0
Y1
0
O
θ
X
Y1
Z
Z1

図 4 座 標 系
Coordinate system

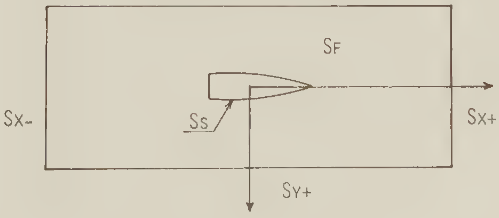

SY-
SF
SX-
SS
SX+
SY+

図 5 検 査 面
Control surface

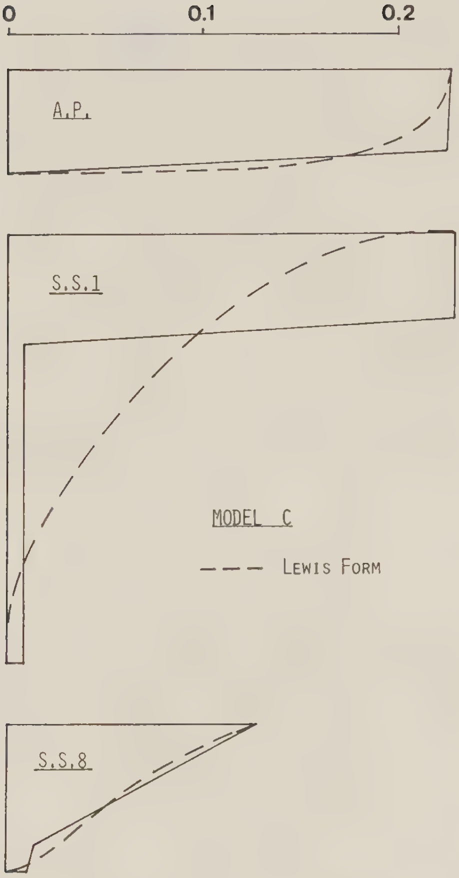

0
0.1
0.2
A.P.
S.S.1
MODEL C
– – – Lewis Form
S.S.8

図 6 Lewis form による断面近似
Ship form and Lewis form

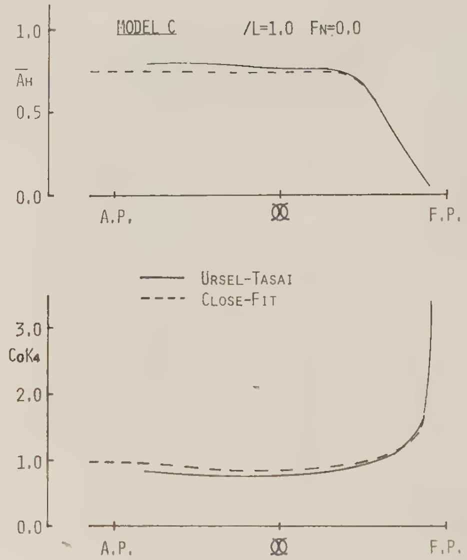
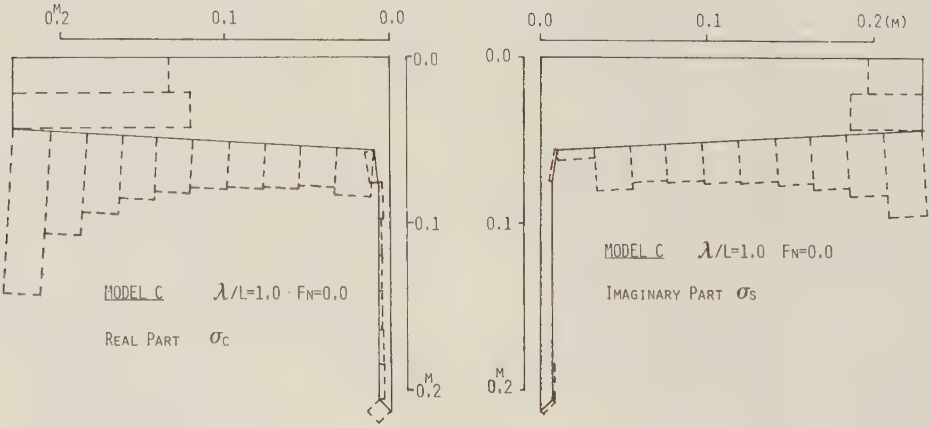


図 7 2次元流体力特性
Two dimensional hydrodynamic characteristics



(a) (b)

図 8 横断面上での吹き出し分布（S.S. 1）
Source distribution（S.S. 1）

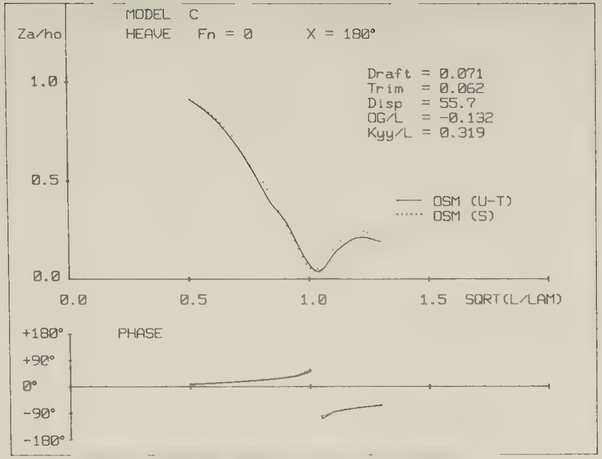


図 9 Heave の計算値
Calculated value of Heave

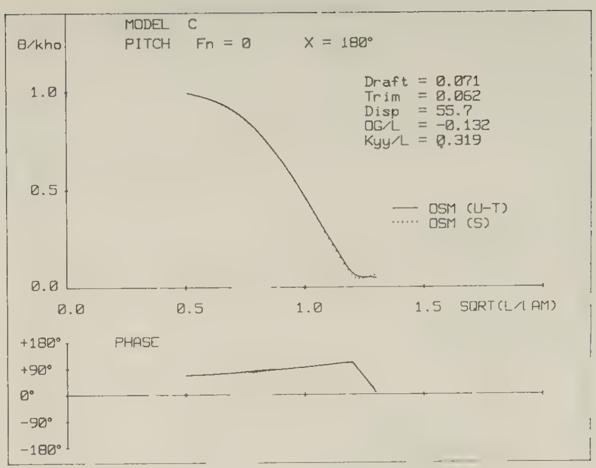


図 10 Pitch の計算値
Calculated value of Pitch

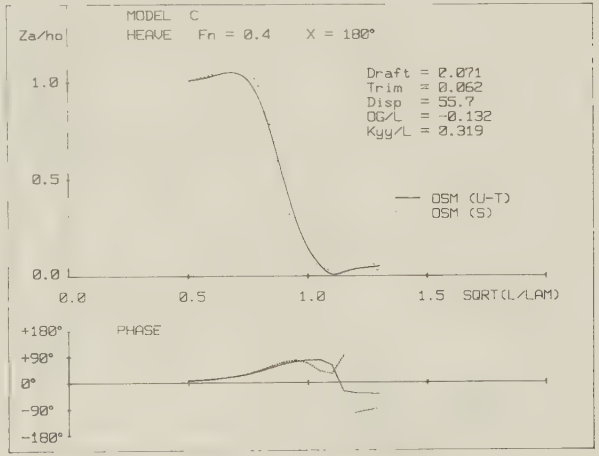


図 11 Heave の計算値
Calculated value of Heave

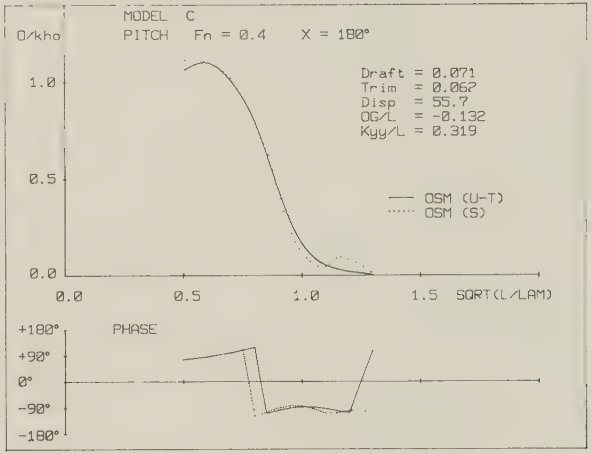


図 12 Pitch の計算値
Calculated value of Pitch

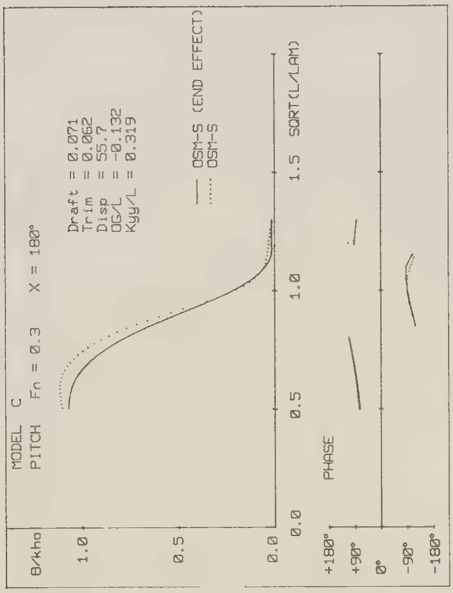


図 14 Pitch の計算値
Calculated value of Pitch

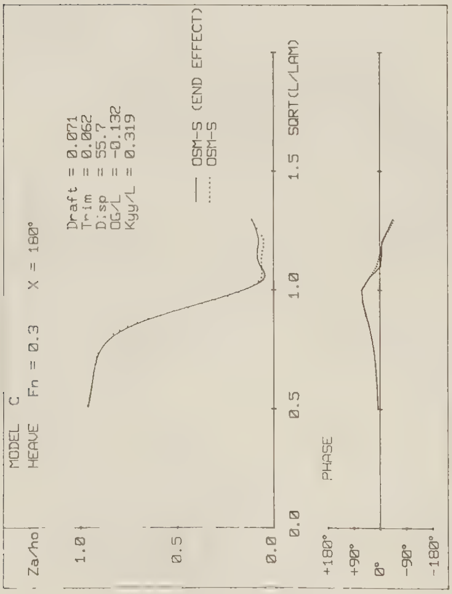


図 13 Heave の計算値
Calculated value of Heave

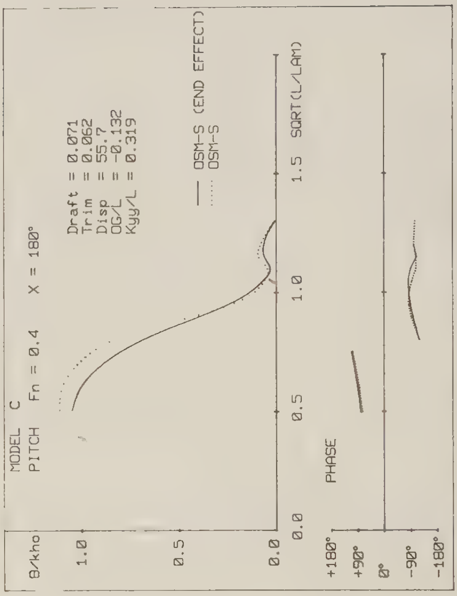


図 16 Pitch の計算値
Calculated value of Pitch

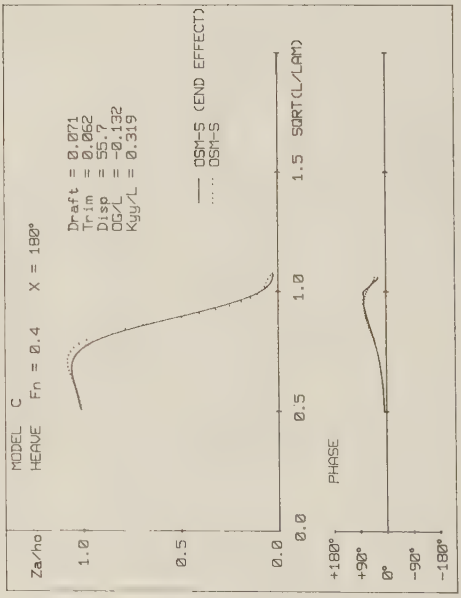


図 15 Heave の計算値
Calculated value of Heave

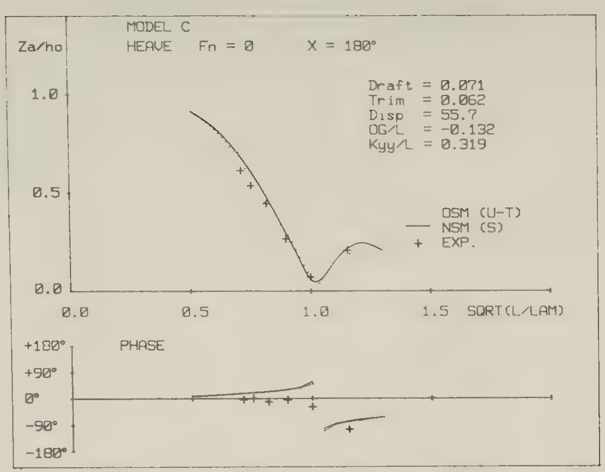


図 17 Heave の計算値と実験値

Calculated and Measured value of Heave

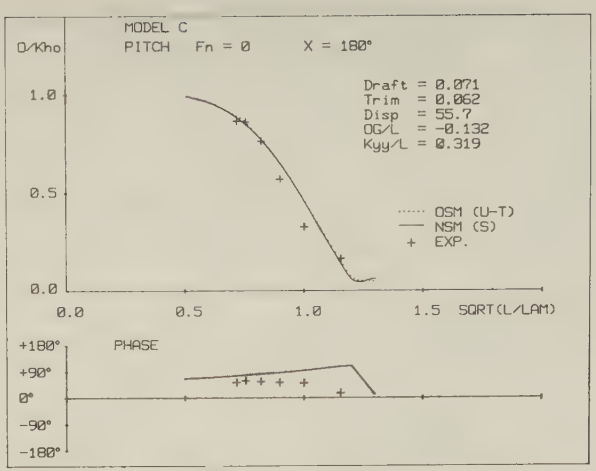


図 18 Pitch の計算値と実験値

Calculated and Measured value of Pitch

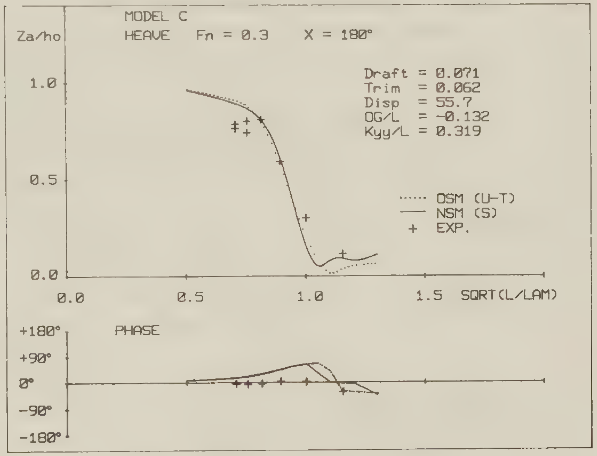


図 19 Heave の計算値と実験値

Calculated and Measured value of Heave

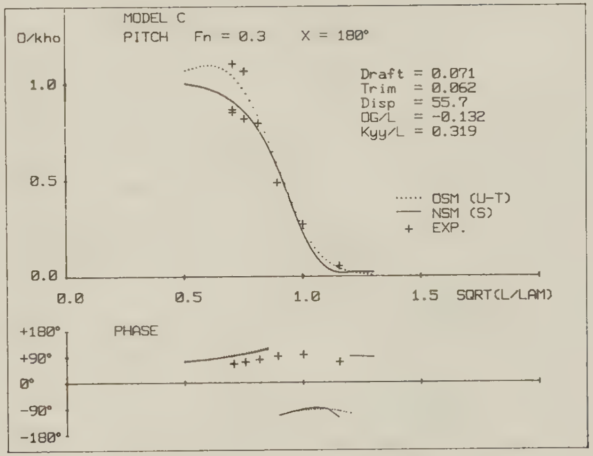


図 20 Pitch の計算値と実験値

Calculated and Measured value of Pitch

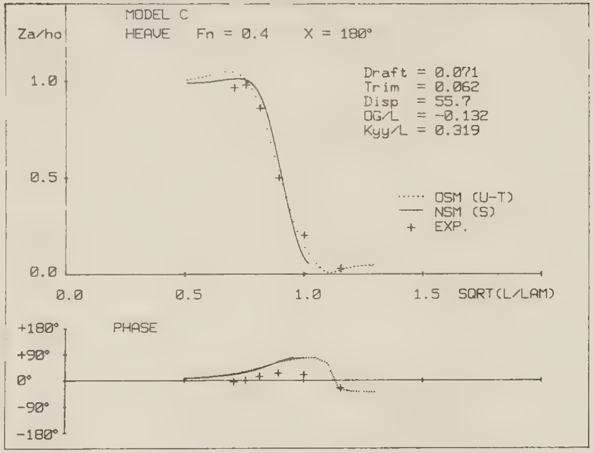


図 21 Heave　の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Heave

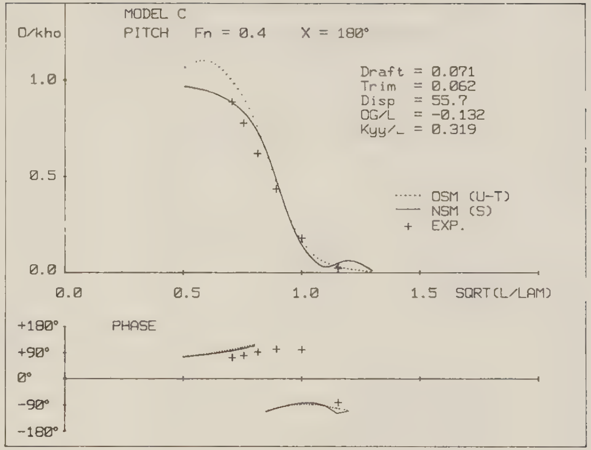


図 22　Pitch の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Pitch

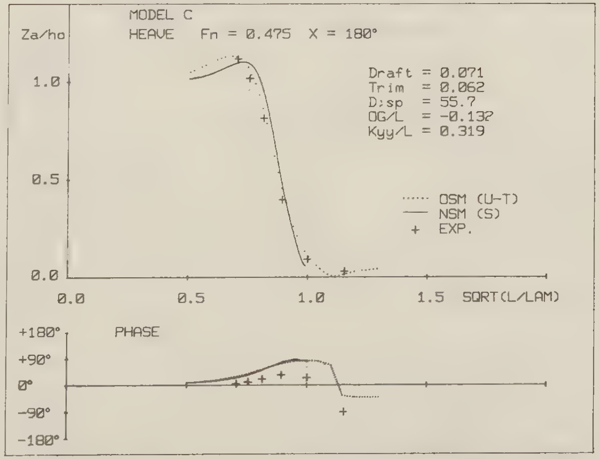


図 23　Heave の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Heave

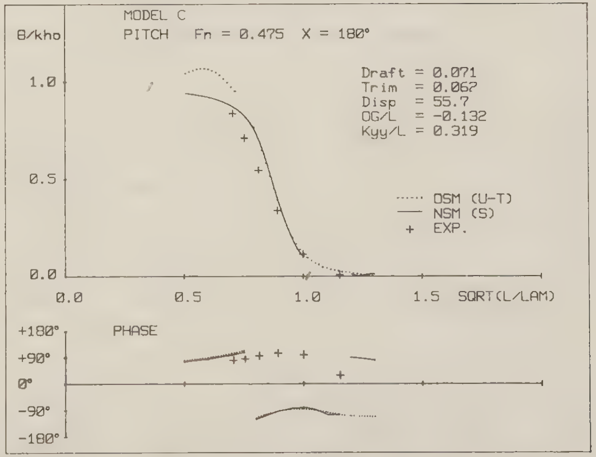


図 24　Pitch の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Heave

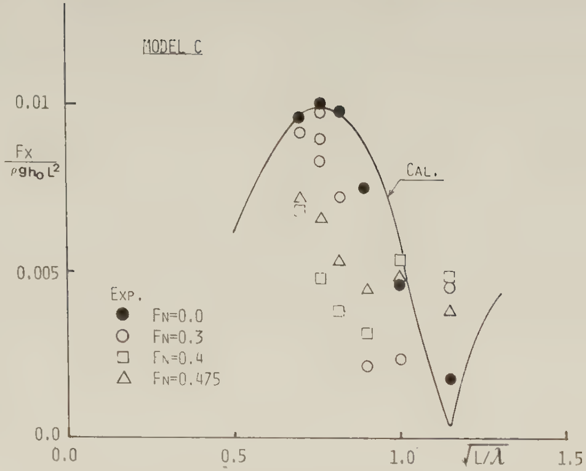


図 25　Surge Force の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Heave

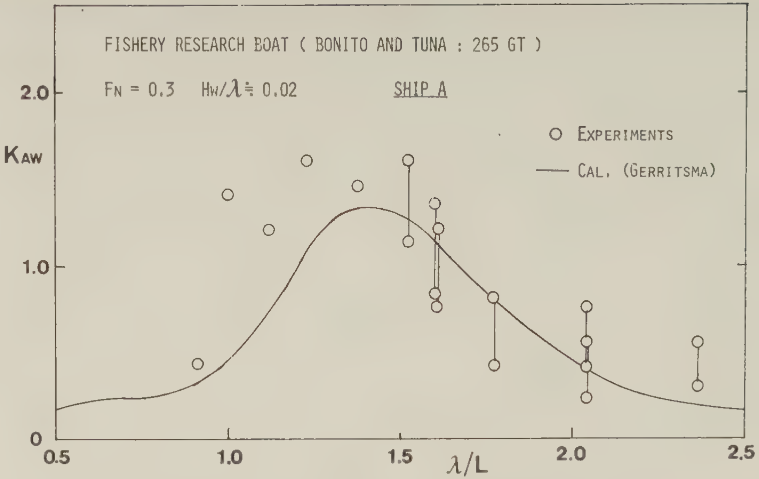


図 26　抵抗増加の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Resistance Increase

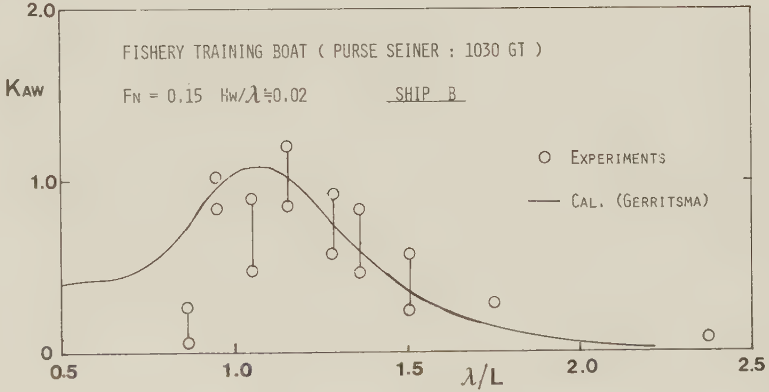


図 27　抵抗増加の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Resistance Increase

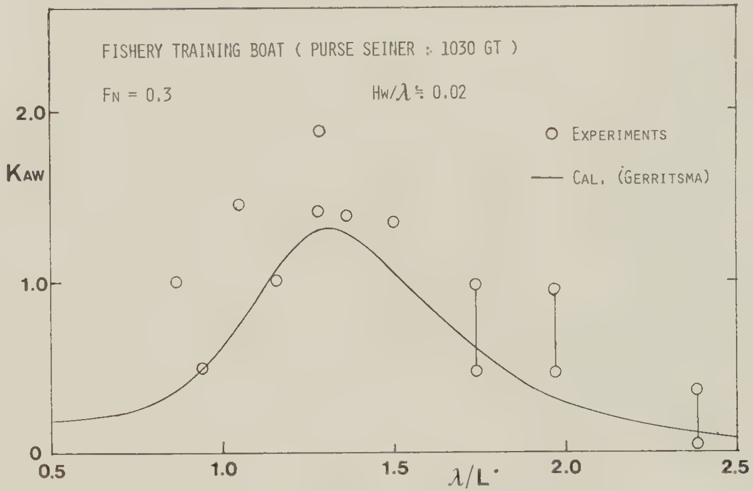


図 28　抵抗増加の計算値と実験値
Calculated and Measured value of Resistance Increase

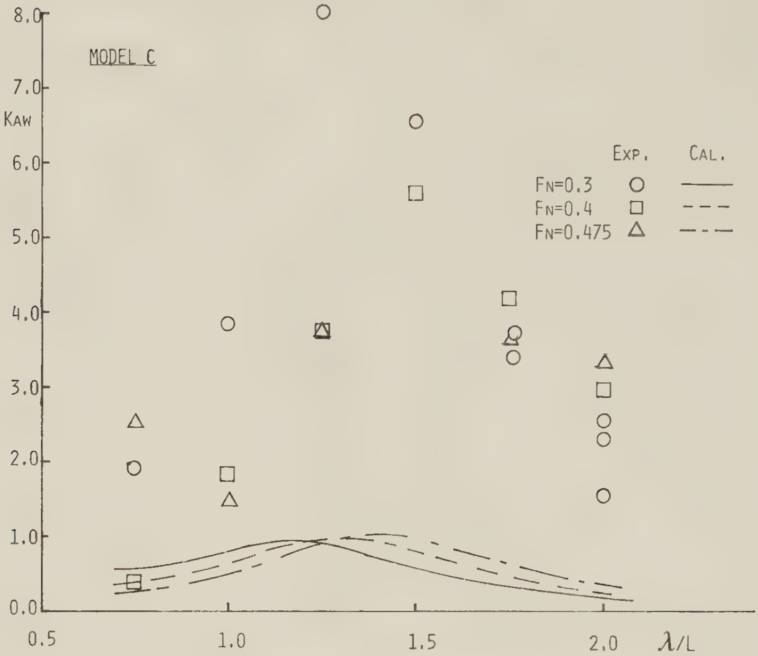


図 29 抵抗増加の計算値と実験値

Calculated and Measured value of Resistance Increase

付　　録

(1) O.S.M. の流体力係数と強制力

$$A_{33}=\int\rho S_z dx$$

$$B_{33}=\int\rho N_z dx-V[\rho S_z]$$

$$C_{33}=2\int\rho g y_w dx$$

$$A_{35}=-\int\rho S_z x_b dx$$

$$B_{35}=-\int\rho N_z x_b dx+V\int\rho S_z dx+V[\rho S_z x_b]$$

$$C_{35}=-2\int\rho g y_w x_b dx+V\int\rho N_z dx-V^2[\rho S_z]$$

$$A_{53}=-\int\rho S_z x_b dx$$

$$B_{53}=-\int\rho N_z x_b dx-V\int\rho S_z dx+V[\rho S_z x_b]$$

$$C_{53}=-2\int\rho g y_w x_b dx$$

$$A_{55}=\int\rho S_z x_b^2 dx$$

$$B_{55}=\int\rho N_z x_b^2 dx-V[\rho S_z x_b^2]$$

$$C_{55}=2\int\rho g y_w x_b^2 dx-V\int\rho N_z x_b dx$$
$$-V^2\left\{\int\rho S_z dx-[\rho S_z x_b]\right\}$$

$$\left.\begin{matrix}F_{zc}\\F_{zs}\end{matrix}\right\}=2\,\rho g h_0\int c_1c_2y_w\begin{pmatrix}\cos k^*x\\\sin k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+\,h_0\omega\omega_e\int\rho S_z c_1c_2\begin{pmatrix}-\cos k^*x\\-\sin k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+\,h_0\omega\int\rho\,N_z c_1c_2\begin{pmatrix}\sin k^*x\\-\cos k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$-h_0\omega V\left[\rho S_z c_1c_2\begin{pmatrix}\sin k^*x\\-\cos k^*x\end{pmatrix}\right]$$

$$\left.\begin{matrix}M_{yc}\\M_{ys}\end{matrix}\right\}=2\,\rho g h_0\int c_1c_2y_w x_b\begin{pmatrix}-\cos k^*x\\-\sin k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+\,h_0\omega\omega_e\int c_1c_2\rho S_z x_b\begin{pmatrix}\cos k^*x\\\sin k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+\,h_0\omega\int c_1c_2\rho N_z x_b\begin{pmatrix}-\sin k^*x\\\cos k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+h_0\omega V\int c_1c_2\rho S_z\begin{pmatrix}-\sin k^*x\\\cos k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+h_0\omega V\left[c_1c_2\rho S_z x_b\begin{pmatrix}\sin k^*x\\-\cos k^*x\end{pmatrix}\right]$$

$$A_{11}=0$$

$$B_{11}=0$$

$$C_{11}=0$$

$$\left.\begin{matrix}F_{xc}\\F_{xs}\end{matrix}\right\}=\rho g h_0 k^*\int c_1c_2\frac{dS}{dx}\begin{pmatrix}\sin k^*x\\\cos k^*x\end{pmatrix}dx$$

ただし，$x_b=x-x_G$，$k^*=k\cos\chi$

$c_1=\sin(ky_w\sin\chi)/(ky_w\sin\chi)$　　$\chi\fallingdotseq n\pi$

$\quad=1.0$　　　　　　$\chi=n\pi$，$n=0$，1，2…

$c_2=e^{-k\sigma_d}$

$\sigma=S/(2y_wT)$

S，y_w，T は各断面の面積，幅，喫水である。

(2) N.S.M. の流体力係数と強制力

$$A_{33}=\int\rho S_z dx$$

$$B_{33}=\int\rho N_z dx-V[\rho S_z]$$

$$C_{33}=2\int\rho g y_w dx-V[\rho N_z]$$

$$A_{35}=-\int\rho S_z x_b dx-\frac{V}{\omega_e^2}\int\rho N_z dx$$

$$B_{35}=-\int\rho N_z x_b dx+V\int\rho S_z dx+V[\rho S_z x_b]$$
$$+\frac{V^2}{\omega_e^2}[\rho N_z]$$

$$C_{35}=-2\int\rho g y_w x_b dx-V^2[\rho S_z]+V[\rho N_z x_b]$$

$$A_{53}=-\int\rho S_z x_b dx+\frac{V}{\omega_e^2}\int\rho N_z dx$$

$$B_{53}=-\int\rho N_z x_b dx-V\int\rho S_z dx+V[\rho S_z x_b]$$

$$C_{53}=-2\int\rho g y_w x_b dx+V[\rho N_z x_b]$$

$$A_{55}=\int\rho S_z x_b^2 dx$$

$$B_{55}=\rho\int N_z x_b^2 dx-V[\rho S_z x_b^2]$$

$$C_{55}=2\int\rho g y_w x_b^2 dx-V^2\left\{\int\rho S_z dx-[\rho S_z x_b]\right\}$$
$$-V[\rho N_z x^2]$$

$$\left.\begin{matrix}F_{zc}\\F_{zs}\end{matrix}\right\}=2\,\rho g h_0\int c_1c_2y_w\begin{pmatrix}\cos k^*x\\\sin k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+\,h_0\omega\omega_e\int\rho S_z c_1c_2\begin{pmatrix}-\cos k^*x\\-\sin k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$+\,h_0\omega\int\rho\,N_z c_1c_2\begin{pmatrix}\sin k^*x\\-\cos k^*x\end{pmatrix}dx$$
$$-h_0\omega V\left[\rho S_z c_1c_2\begin{pmatrix}\sin k^*x\\-\cos k^*x\end{pmatrix}\right]$$
$$+h_0\frac{\omega}{\omega_e}V\left[\rho N_z c_1c_2\begin{pmatrix}-\cos k^*x\\-\sin k^*x\end{pmatrix}\right]$$

$$
\begin{aligned}
\begin{pmatrix} M_{yc} \\ M_{ys} \end{pmatrix} = {} & 2\,\rho g h_0 \int c_1 c_2 y_w x_b \begin{pmatrix} -\cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{pmatrix} dx \\
& + h_0 \omega \omega_e \int c_1 c_2 \rho S_z x_b \begin{pmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{pmatrix} dx \\
& + h_0 \omega \int c_1 c_2 \rho N_z x_b \begin{pmatrix} -\sin k^* x \\ \cos k^* x \end{pmatrix} dx \\
& + h_0 \omega V \int c_1 c_2 \rho S_z \begin{pmatrix} -\sin k^* x \\ \cos k^* x \end{pmatrix} dx \\
& + h_0 \omega V \left[c_1 c_2 \rho S_z x_b \begin{pmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{pmatrix} \right] \\
& + h_0 \frac{\omega}{\omega_e} V \int \rho N_z c_1 c_2 \begin{pmatrix} -\cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{pmatrix} dx \\
& + h_0 \frac{\omega}{\omega_e} V \left[\rho N_z c_1 c_2 x_b \begin{pmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{pmatrix} \right]
\end{aligned}
$$

$$A_{11} = 0$$

$$B_{11} = 0$$

$$C_{11} = 0$$

$$\left. \begin{matrix} F_{xc} \\ F_{xs} \end{matrix} \right\} = \rho g h_0 k^* \int c_1 c_2 \frac{dS}{dx} \begin{pmatrix} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{pmatrix} dx$$

なお，O.S.M. の C_{35} のうち $V\int \rho N_z dx$ の項が Timman-Newman の関係を不成立にさせる項である。N.S.M. では Timman-Newman の関係は成立している。

The Seakeeping Quality of Fishing Boats in Waves (Part 3)

— Resistance Increase in Head Seas —

By

YASUYUKI YAMAKOSHI, NAOYA UMEDA and SHIRO SUZUKI

Summary

In the hull form design of fishing boats, one must consider not only the propulsion quality in the calm water, but also the propulsion quality in waves. This paper deals with the resistance increase in head seas which is a dominant component of the propulsion quality in waves. The authors carried out the calculations by the Gerritsma's formula and the model experiments in a towing tank. These results showed the usefulness of the formula for fishing boats of the round chine type.

The calculations of the resistance increase depend on the prediction of motion in waves. Therefore the validity of the strip methods was examined. These results showed the fairy good agreement between the predicted values by the strip methods and the experimental ones. And further, it was shown that the end effect of the strip methods cannot be ignored in the prediction of a fishing boat of the hard chine type with a transom stern.

水工研報告 6
1985 pp. 225～242

漁船の船尾形状の改良法に関する研究

川島 敏彦*

目次

1. 緒言……225
2. 船尾形状の改良のための数値計算……226
2.1 推進性能の評価法……226
2.2 SR 183船型の推進性能の計算結果……228
3. 漁船の船尾形状の改良法の考察……230
3.1 母船型……230
3.2 船尾形状の系統的変形……231
3.3 系統的変形船の推進性能の計算結果……234
3.4 船尾形状の改良の一手法……235
4. 結言……240
参考文献……241
Summary……242

1. 緒言

船の船型計画において，推進性能の改善のための船型改良が緊要な問題となって久しい。このことは漁船の分野においても例外でなく，例えば商船の設計を目的として完成された「推進性能の推定のための総合電算システム」を応用する方法[1)2)]や，高性能回流水槽による「船型試験システム」を活用する方法[3)4)]にみられるように，船型計画法に基づく緻密な船型改良が漁船に対して益々行なわれて来つつある。これらの方法に共通することの一つは，検討の対象をプロペラなしでの船体の性能改善に絞らず，船体とプロペラの干渉やプロペラの性能問題を含めた「船体＋プロペラ」系に対する総合的な改良を図ろうとしていることであろう。

「船体＋プロペラ」系に対する検討において，まず船体についての性能改良では通常次の二つの手順を踏む。一つは船体抵抗の改善に関することで，プロペラを装着せずに船体を曳航する時に，どのような船型にすれば抵抗が少なくなるかという問題の求解である。今一つは推進効率の向上に関わるもので，プロペラを作動させる時のプロペラとの干渉によって定まる性能について，プロペラの影響を考慮しながら船型のどの点に改良を加えればよいかについての検討である。他方，プロペラ性能に関する改良においては与えられた船型に対してどのようなプロペラにすればプロペラ性能が改善されるのか，またそのためにはプロペラに対して船型を如何にすればよいのかという検討を必要とする。

これらのどの課題においても船尾形状の検討が求められる。それは船体抵抗との関係については，粘性抵抗が船尾形状と密接不可分な関係にあり，さらに推進効率に対しては，プロペラ作動に基づく抵抗増加量を示す推力減少率や伴流利得を表わす有効伴流係数のおおよそがプロペラ荷重度と船尾形状によって規定されるからである。また，プロペラ性能を構成するプロペラ効率，プロペラキャビテーションや起振力の検討においても，これらは船尾形状によってその構造が大きく特徴づけられる伴流分布が強く関与するため，船尾形状に対する考察が不可欠となる。従って，船型改良において船尾形状の検討は欠くことの出来ない重要課題であると言える。

船尾形状の改良においてはその変形に対する推進性能の変化を予測することが必要になる。このためには系統的模型船の船型試験データを活用することが迅速で確実であると考えられるが，それには広範囲の船型主要目と船型形状について実施された精度の良い模型実験データが不可欠である。しかし漁船を対象とする場合はその利用が難しい状況下にあり，必ずしも現実的な方法ではない。他方，今日においては電子計算機が自由に活用出来る環境にあり，これを駆使した数値計算法を援用することにより限界を踏えた上での対処は可能であると推察される。とりわけ船尾形状のように，検討項目が多岐に渡るのみならず最終的に最適化問題としての求解を控えている問題を対象とする場合には，数値計算はより有効に利用出来るものと思われる。もっともこの手法の確立のためには，広範な検討が必要になると想像されるが，この面での模索は漁船の分野においても不可欠であると考えられる。

---

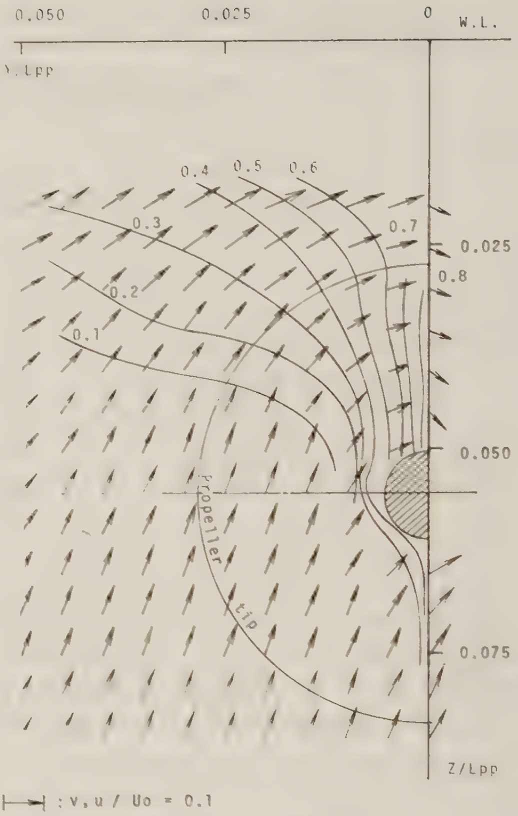
* 漁船工学部

本論文はこのような観点より，漁船の船尾形状の改良法についての検討を試みたものである。まず船尾形状に関係する推進性能を評価するための数値計算法の検討を行ない，これに対応して電算プログラムのシステム化を図った。次にこの計算法の有効性を調べるために，日本造船研究協会5)による船尾形状のシリーズ試験に用いられた船型について計算を行ない実験値と比較した。またまぐろ延縄漁船を例にとり，船尾形状を系統的に変形してその変形に対する性能変化の関係を調べるための試算を行ない，最後に船尾形状の改良手法についての考察を試みた。この論文の主眼は次の2点で，船体抵抗と船型主要目の関係に関する検討で終始せず，この事項を含みながら，(1)プロペラ作動の影響を含めた船型改良法の検討を試みたこと，(2)この際，船尾形状を直接的に取扱って考察を行なったことである。

2.　船尾形状の改良のための数値計算

2.1　推進性能の評価法

FRP 漁船についての高橋1) らの船型改良やまぐろ延縄漁船に対する荻原2) らの検討例から伺えることは，商船を主対象として開発された船型計画法が，滑走型もしくは半滑走型の漁船を除く一般の排水量型漁船に対して有効に適用出来ることである。もっとも造波抵抗面で非線型現象が顕著に生じている例6) にみられるように，漁船に特徴的な船型学上の問題の存在は当然予想されるが，仮にこのことを特別に考慮したとしても適用すべき手法が基本から変わることはないと考えられる。例えば，船尾形状に関係する推進性能に陰に陽に関わる伴流分布については，漁船船型固有のものとする現象は容易に認め難い。図1は当研究所の回流水槽を用いて計測した，本論文で母型とする漁船の伴流分布である。伴流利得が十分行なわれていない，上下間の不均一性が大きい等，上田7) らによって指摘された従来型の漁船に特有な傾向が認められるものの，伴流分布を特徴づけ推進性能の理論的な扱いを困難にする縦渦は強く発生していない。このことから漁船の船尾形状を対象とする場合においても，コンテナ船の船尾形状の改良の検討に用いられた宮田－林－梶谷8)9)10) らの方法や SR 183 5) において実施された検討結果，あるいは船体まわりのポテンシャル流の計算の応用について解説された荻原の論文11)等が直接参考になると考えられる。



Uo = 0.93　m/sec　　Lpp = 2　m
Measured in circular rotating water channel (RIFE)

図 1　母型模型船の伴流分布の計測結果
Measured wake distribution of original model

これらの観点をもとに，(1)プロペラ作動による抵抗増加，(2)造波抵抗，(3)伴流利得及び(4)境界層特性についての評価を目的とする電算プログラムを作製した。この際，これらの性能の一つを推定するだけでも容易でない上に，それが複数になるため計算量が膨大になることが予想される。そこで少なくとも与えられた任意の船尾形状に対する定性的評価が出来ることを念頭においた。また其々の性能計算は電算プログラム上独立させ，入出力データを介して電算機内で有機的に結びつけて計算の効率を図った。図2はこの概要を示すものである。なお船尾形状の検討においては，伴流分布を考慮することが必要である。しかし伴流の推定が難しいのでここでは考えておらず主機関馬力の低減問題に直接関係するこれら4つの評価項目を議論の対象とした。その詳細は次のとおりである。

(1)　プロペラ作動による抵抗増加

船体とプロペラの干渉の主要部は，ポテンシャル理論で説明がつくと言われている。ここでは波なし非粘性の仮定のもとに，プロペラを sink モデルで表わし，プロペラによる抵抗増加量 ΔR_D を Lagally の定理で求める

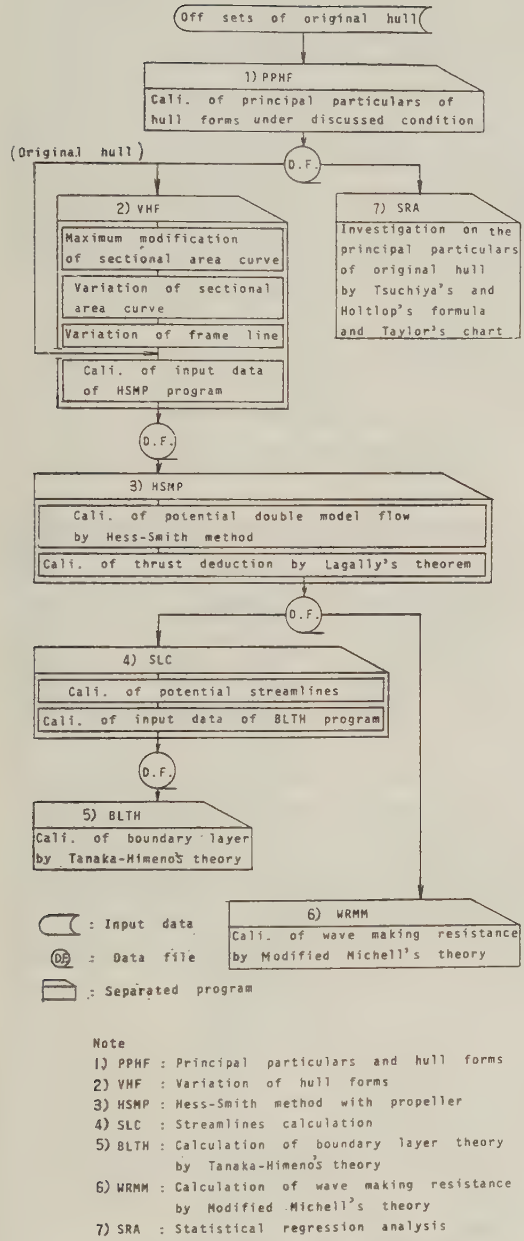

Off sets of original hull
1) PPHF
Cali. of principal particulars of hull forms under discussed condition
(Original hull)
D.F.
2) VHF
Maximum modification of sectional area curve
Variation of sectional area curve
Variation of frame line
Cali. of input data of HSMP program
7) SRA
Investigation on the principal particulars of original hull by Tsuchiya's and Holtlop's formula and Taylor's chart
D.F.
3) HSMP
Cali. of potential double model flow by Hess-Smith method
Cali. of thrust deduction by Lagally's theorem
D.F.
4) SLC
Cali. of potential streamlines
Cali. of input data of BLTH program
D.F.
5) BLTH
Cali. of boundary layer by Tanaka-Himeno's theory
6) WRMM
Cali. of wave making resistance by Modified Michell's theory
: Input data
D.F. : Data file
: Separated program
Note
1) PPHF : Principal particulars and hull forms
2) VHF : Variation of hull forms
3) HSMP : Hess-Smith method with propeller
4) SLC : Streamlines calculation
5) BLTH : Calculation of boundary layer theory by Tanaka-Himeno's theory
6) WRMM : Calculation of wave making resistance by Modified Michell's theory
7) SRA : Statistical regression analysis

図 2 船尾形状の改良のための数値計算法

Numerical calculation to improve aft hull form

方法を用いた。林9)らによって示された定式をそのまま用いると，ΔR_D は(1)式にて表示される。

$$\Delta R_D=\sum\{-\rho(m_{Hi}+\Delta m_{Hi})(V_{Pi}+V_{Hi}+\Delta V_{Hi})+\rho m_{Hi}V_{Hi}\} \qquad (1)$$

ただし各変数は次のとおりである。

ρ：流体密度

m_{Hi}：プロペラなし船体表面上の特異点強さ

$m_{Hi}+\Delta m_{Hi}$：プロペラ付船体表面上の特異点強さ

V_{Hi}：プロペラなし船体表面上での船体表面特異点による誘導速度の船長方向成分

V_{Pi}：プロペラの船体表面に対する誘導速度の船長方向成分

$V_{Hi}+\Delta V_{Hi}$：プロペラ付船体表面上での船体表面特異点による誘導速度の船長方向成分

ここで，プロペラの影響によって生ずる船体表面特異点強さと誘導速度の修正量 Δm_{Hi}，ΔV_{Hi} を無視すれば(2)式となる。

$$\Delta R_D=\sum\{-\rho m_{Hi}(V_{Pi}+V_{Hi})+\rho m_{Hi}V_{Hi}\} \qquad (2)$$

この計算で必要なプロペラ特異点強さ m_P は，自航試験で計測されたスラスト T から定められる方法がよく見られる。ここでは実験データを用いることは一切行なわず，まずあらかじめ適当なプロペラ荷重度 C_T を与えて ΔR_D を計算して $T\ (=R_t+\Delta R_D)$ を求める。次にこれから得られる C_T と入力値として用いた C_T が同一になる条件を繰返し計算で得て C_T を定め，(3)式から m_P を決める方法をとった。ただし R_t は船体抵抗で，実験データがない場合は土屋の式12)を用いて推定した。

$$m_P=1-w_P-\sqrt{(1-w_P)^2+C_T} \qquad (3)$$

$$C_T=T\Big/\frac{1}{2}\rho A_0U_0^2$$

ここで w_P はポテンシャル伴流係数，A_0 はプロペラ面の面積，U_0 は船速である。

(2) 造波抵抗

船尾形状の検討において，造波抵抗は他の特性に比べてそれ程重要ではないと思われるが，漁船を対象とする場合，F_n が高いことや船尾形状が十分最適化されていない可能性があるため計算の必要性は大きいと思われる。計算は荻原11)により実用船型に対する計算結果が紹介された Modified Michell 理論を適用した。この計算結果によれば，主要目が漁船に比較的近い船型について船型間の差がよく表現されており，また Hess-Smith 法による計算結果をより有効に利用出来る観点から，本研究の目的に適っていると思われる。造波抵抗係数 C_w は，上流方向を x 軸(原点は船体中央，静水面)，右舷方向を y 軸，鉛直上方を z 軸とする右手系直交座標を用い(4)，(5)式によって求められる。

$$C_w=R_w\Big/\frac{1}{2}\rho L^2_{wL}U_0^2 \qquad (4)$$

$$R_w=\pi\rho U_0^2\int_0^{\pi/2}(c^2+s^2)\cos^3\theta d\theta \qquad (5)$$

$$\left.\begin{matrix} c \\ s \end{matrix}\right\}=\frac{2g}{\pi U_0{}^3}\iint v(z,\ x)e^{K_0 z\sec^2\theta}$$

$$\begin{matrix}\cos\\ \sin\end{matrix}(K_0 x\sec\theta)\sec^3\theta\, dz\, dx$$

ただし $K_0=g/U_0{}^2$, g は重力加速度である。また v は船体表面上の横方向流速成分で，Hess-Smith 法の計算で求めた。

(3) 伴流利得

馬力推定に必要な有効伴流係数 w_e を数値計算で推定する方法として，中武―山崎の方法[13]や池畑[14]の例のように自航試験のシミュレーションに従って求める方法があげられる。しかし，これらの手法では船体伴流中でのプロペラ性能計算の入力として伴流分布を予測することが必要になるため，問題が難しくなってしまう。ここではともかく船尾形状の変形に対する性能変化の定性的な動向が分ればよいので，SR 183[5]において検討された船体表面ポテンシャル流線から得られる Yss 5 の値で伴流利得率を評価する方法をとった。ここでYss5は，図3に示すようにプロペラトップ位置に流入する流線の S.S. 5 での横方向座標値である。流線の計算は，Hess-Smith 法で得られた船体表面の分割パネルの中心位置での流速値を用いて任意点の流速を補間して求め，流線方程式を解いた。この際，流線を上流から追跡して行く段階で船体表面から離れてしまう問題が生じたが，これについてはその都度に流線を強制的に船体表面上の最近接位置に合わせることで対処した。

(4) 境界層特性

三次元乱流境界層計算は田中―姫野第一近似理論[15]を用い，船尾流場の構造の理解を図った。また粘性圧力抵抗の評価を目的として姫野ら[16]によって検討された Squire-Yougの式を用いて運動量損失量を計算する機能を組み入れた。

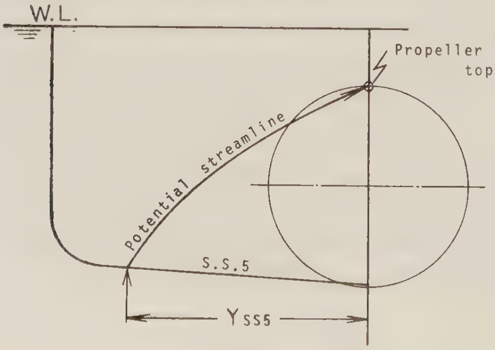


図 3 Yss 5の定義
Definition of Yss 5

表 1 SR 183 船尾形状シリーズ模型船の船型主要目
Principal particulars of SR 183 models

M.S.NO	Lpp (m)	B (m	d (m)	Cb	Cp	Cw	lcb
SR183A	2.025	0.450	0.132	0.604	0.623	0.758	1.78
SR183B				0.604	0.623	0.758	1.78
SR183C				0.604	0.623	0.758	1.77
SR183D				0.604	0.623	0.759	1.78
SR183E				0.605	0.624	0.793	1.86
SR183F				0.604	0.623	0.760	1.78

Fn 0.26

2.2 SR183 船型の推進性能の計算結果

以上の数値計算法に従って組み立てられた電算プログラムの有効性を調べるために，実験データと比較した。しかし漁船船型について船尾形状に関する系統的模型試験を行なった例が見当らないので，SR 183[5]で実施された浅吃水幅広船のシリーズ実験結果と比べた。計算は表1に主要目を示す6隻の船型に対して行なった。これらの船型はAを母船型とする船尾肋骨線のシリーズ船型で，いずれも船型主要目及び横截面積曲線は概略同じである。

プロペラ作動による抵抗増加量 ΔR_D から得られる推力減少率の計算結果を図4に示す。図中の実線はプロペラの誘導速度を考慮せずに船体表面の特異点強さを求めて，この値から ΔR_D を計算する(2)式を用いて得たものである。また一点鎖線はプロペラの誘導速度を考慮する(1)式から求めたものである。自由表面影響や粘性影

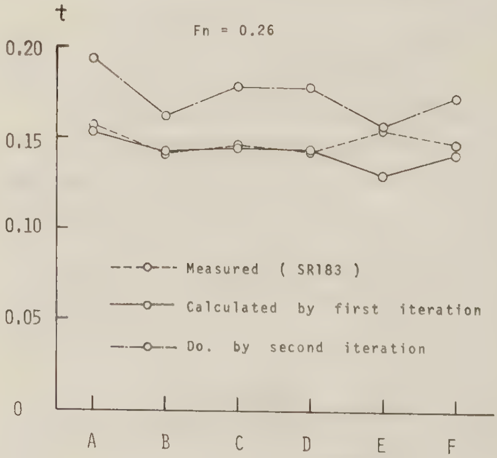


図 4 推力減少率の計算結果
Comparison of thrust deduction (SR 183)

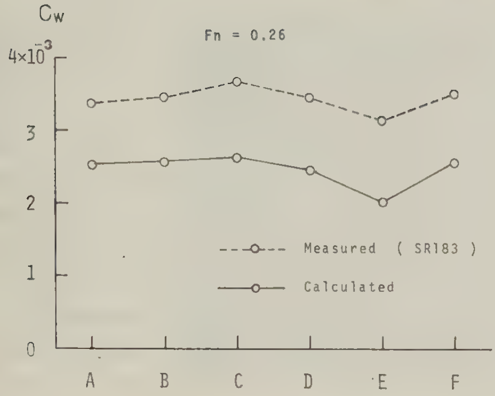


図 5　造波抵抗の計算結果

Comparison of wave making resistance (SR 183)

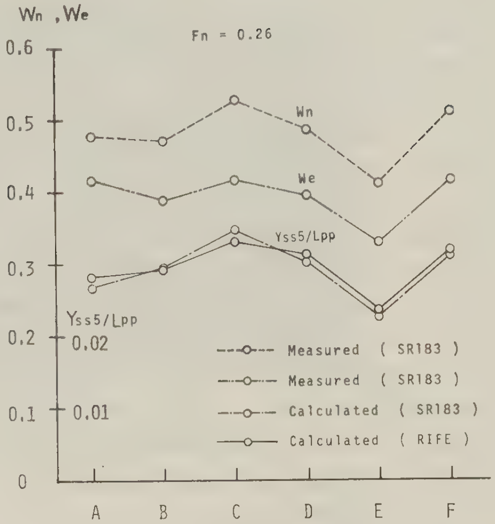


図 6　伴流利得の計算結果

Comparison of wake gain (SR 183)

響，さらに舵の影響を取り入れていないにもかかわらず実験値をよく表わしているといえよう。ここで問題となるのは，計算によって船型間の差がどこまで表現出来るかと言うことである。この点についてはどちらかと言えば(1)式による結果が若干優れているように見受けられる。しかし2倍の計算時間を費やす割には効果は小さい。なおE船型だけが他船型に比べて傾向が異なっているが，原因は不明である。

造波抵抗の計算結果を図5に示す。定量的なことは別にして定性的に船型間の C_w の大小関係はよく表現出来ていると言える。しかし玉島ら[6]による漁船の造波抵抗に関する実験結果から推察されるように，一般的に漁船では造波レベルが高く非線型現象が顕著であるので，漁船船型への適用性については詳細な検討を要すると考えられる。

伴流利得を表わすYss5の計算結果を図6に示す。図中の破線はSR 183で行なわれた計算結果である。少し値は異なるものの，全般的にほぼ妥当と言える。

境界層計算に関しては，母型であるAと低抵抗船として導出されたE船型についての運動量厚さ θ と Squire-Young のパラメーター θ_∞ の計算結果を図7に示す。こ

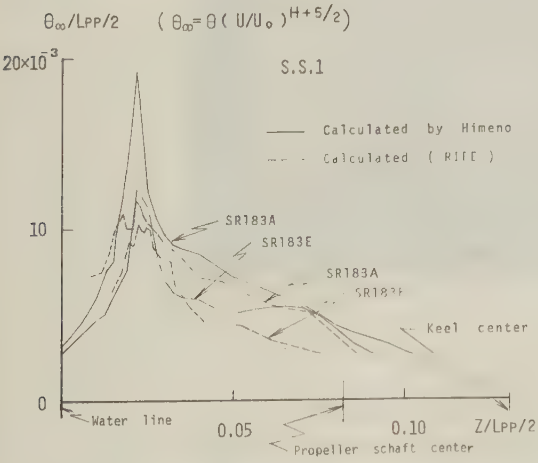


図 7(a)　境界層の運動量厚さの計算結果

Comparison of momentum thickness in boundary layer (SR 183)

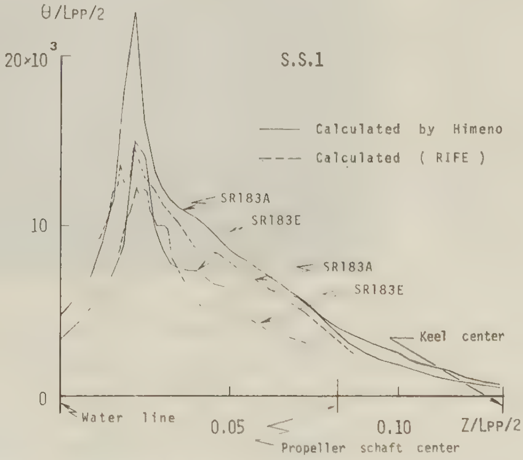


図 7(b)　運動量損失に基づく抵抗成分の計算結果

Comparison of momentum-drag component (SR 183)

れは S.S. 1 断面での深さ方向 z に対する分布を表わすもので，図中の実線は姫野ら[16)]によって微小二次流れ仮定の理論を用いて計算されたものである。第一近次理論を用いた計算結果は，境界層が最も厚くなる所を含んで全体的に小さくなる傾向にあり定量的な一致は悪いが，境界層特性についての定性的な特徴は得られていると考えられる。ただし運動量損失量の計算結果については，船型間の差を十分に表現出来る精度が得られなかった。これには，水面もしくはキールセンター近傍域を含めた計算を精度よく行なう必要のあることが判明した。

以上のとおり，理論面の見直しや数値計算上の改良等いくつかの問題を残しているものの，計算結果は船型間の推進性能の違いを比較的よく表現していると考えられる。このことから簡単な数値計算法を組み合わせた方法ではあるが，限界を踏えた上で漁船の船尾形状の検討に応用できるものと判断される。

3.　漁船の船尾形状の改良法の考察

3.1　母船型

本論文で船尾形状の改良検討の母型としたまぐろ延縄漁船の船型主要目を表 2 に示す。漁船は漁業種類によって船型主要目や船型形状が大きく異なるが，その中でこの船型は L/B が大きく Cb は小さい部類に属する。また船尾流場については，先の図 1 はこの船型の模型船（L_{PP} = 2 m）を用いた漁場発満載状態における伴流分布で，既述のとおり強い縦渦は発生していない。さらにこの時の船尾流場を二段タフト法により可視化した結果を図 8 に示す。この場合，ある漁業調査船についての可視化例である図 9 に示されるようなプロペラ前方上方域に発生している三次元剝離は認められず，流場は全般に安定していることが分る。従って主要目及び船尾流場についてのこのような特徴から，造波現象や船体とプロペラとの干渉の取扱いが容易になることが予想されるため，船尾形状の改良法の試検討用の供試船として適当であると考えられる。

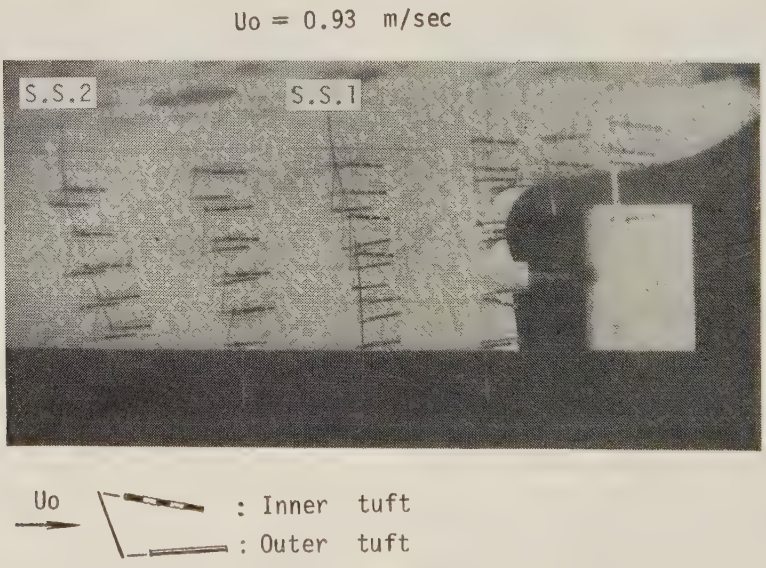
ここで主要目の考察を少し行なう。この船型について，船速，排水量及び吃水を一定にして船型主要目 L_{WL}/B, Cb を変えた場合の有効馬力を Taylor 図表を

表 2　母型まぐろ延縄漁船の船型主要目

Principal particulars of original tuna fishing boat

LwL (m)	Lpp (m)	B (m)	d (m)	Cb	Cp	Cw	lcb
50.2	48.0	8.60	3.39	0.665	0.689	0.833	3.91

Fn = 0.26 ，Trim : t/Lpp = .03125



Observed in circular rotating water channel (RIFE)

図 8　母船型の船尾流場

Results of stream flow observation with twin tufts (original tuna fishing model)

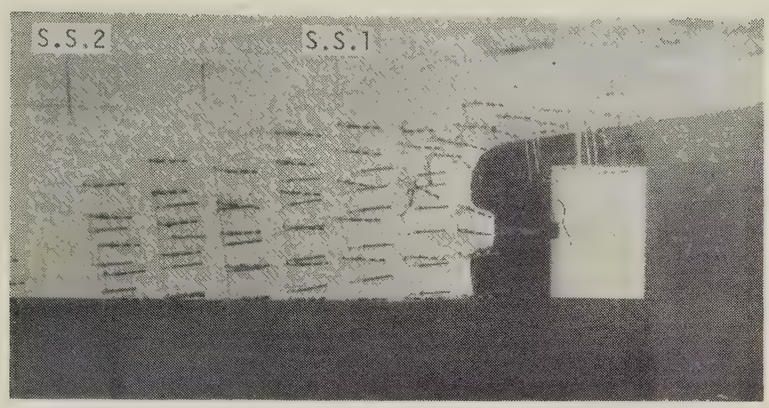
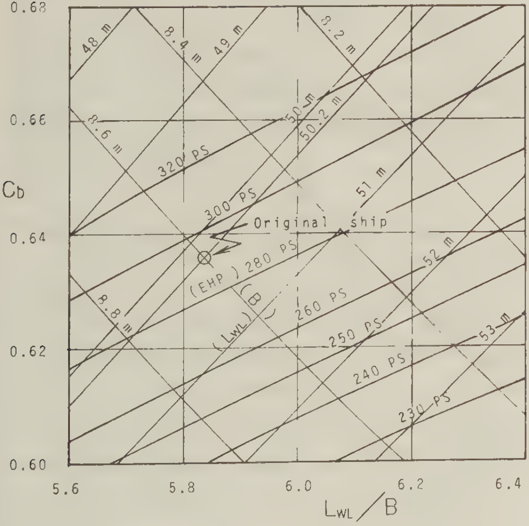


図 9　ある漁業調査船の船尾流場

Results of stream flow observation with twin tufts
(fishery research model)

用いて計算した。図10はこの結果を示すもので，表示は森[17]によって解説された方法に従ったものである。この結果によれば，Cb を小さくする必要があるという指針が得られ，主要目の見直しが求められる。この例から伺えるように，漁船を対象とする場合は船型主要目の検討が商船にも増して緊要にあると考えられる。この場合，主要目の検討の重要性についての森の指摘[17]や小型内航貨物船に対して船型の形状改良だけでなくその前段階での主要目検討を含む総合的な改良がなされた梶谷[18]の方法が留意される。しかし本論文では船型の最適化が目的ではないので，母型の主要目の見直しの余地のあることを指摘するだけとし，この面での改良が行なわれていることを前提としてその船尾形状に着目する。



Note
$d = 3.39$ m , $\nabla = 930$ m^3 , $Fn = 0.26$

図 10　母船型の主要目の検討結果

Results of investigation on the principal particulars of original hull

3.2　船尾形状の系統的変形

母型の船尾形状を初期値として主要目を不変とする条件のもとで横截面線曲線と肋骨線の変形を行ない，船型形状の変化が推進性能におよぼす影響を解析的に導出することが出来れば有用であると考えられる。図2に示すVHFはこの機能を持つプログラムで，船尾形状の変形法は林ら[9]によって行なわれた手法を参考にした。

(1)　横截面積曲線の変形

船尾での母型に対する横截面積曲線の変形量を3次曲線で表示出来るものと仮定する。まず図11に示すように，船首位置を原点に船尾方向を x 軸として，形状の変形開始位置を x_0，変節位置を x_1，変形の終了位置を x_2 とする。ここで，$x_0<x<x_1$ と $x_1<x<x_2$ の其々排水容積の付加と削減を行なう領域における横截面積曲線の変形形状を x の3次関数 $\Delta C_{P1}(x)$，$\Delta C_{P2}(x)$ で表示し，これを次の条件で解いた。

(i) $$\int_{x0}^{x1}\Delta C_{P1}(x)\,dx=-\int_{x1}^{x2}\Delta C_{P2}(x)\,dx$$

（排水量一定）

(ii) $$\frac{d\Delta C_{P1}(x)}{dx}=\frac{d\Delta C_{P2}(x)}{dx}\qquad \text{at } x=x_1$$

（スプライン接続）

(iii) $$\frac{d\Delta C_{P1}(x)}{dx}=0\qquad \text{at}\quad x=x_0$$

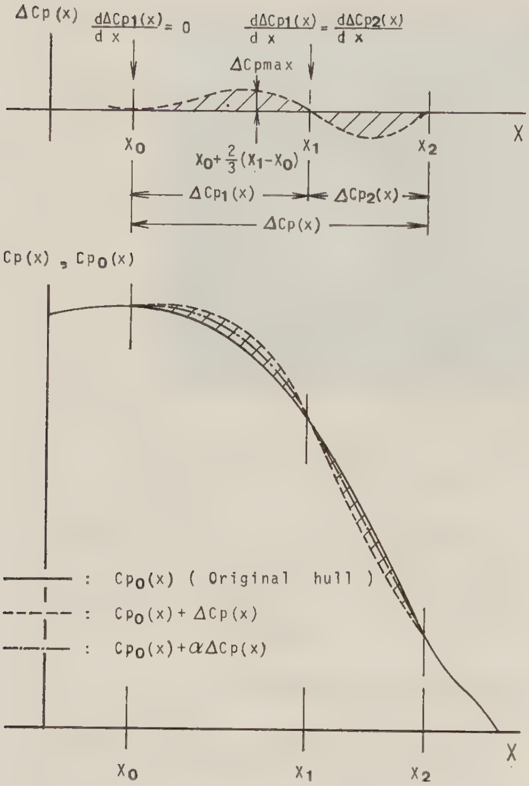

ΔCp(x)
dΔCp1(x)/dx = 0
dΔCp1(x)/dx = dΔCp2(x)/dx
ΔCpmax
X0
X0+2/3(X1-X0)
X1
X2
X
ΔCp1(x)
ΔCp2(x)
ΔCp(x)
Cp(x) , Cp0(x)
: Cp0(x) (Original hull)
: Cp0(x)+ ΔCp(x)
: Cp0(x)+αΔCp(x)
X0
X1
X2
X

図 11　横截面積曲線の変形

Modification of sectional area curve

$$\left.\begin{array}{lll}\Delta C_{P1}(x)=0 & \text{at} & x=x_0\\ \Delta C_{P1}(x)=0 & \text{at} & x=x_1\\ \Delta C_{P2}(x)=0 & \text{at} & x=x_1\\ \Delta C_{P2}(x)=0 & \text{at} & x=x_2\end{array}\right\}\ （端点条件）$$

ただし，これらの条件を満す8個の未知数を求めるためには条件がもう一つ必要である。$\Delta_{P1}(x)$ は $x=x_0+\frac{2}{3}(x_1-x_0)$ の位置で最大となるので，この値を $\Delta C_{P\max}$ として与えて最大変形量を規定する。またここで $\Delta C_{P1}(x)$ と $\Delta C_{P2}(x)$ によって示される変形形状を改めて $\Delta C_P(x)$ として，これを最大変形形状とする。

以上によって定まる $\Delta C_P(x)$ と林らの方法[9] と同様に変形定数 α を用いて，任意の変形船の横截面積曲線 $C_P(x)$ は（6）式にて表現出来るものとする。

$$C_P=C_{P0}(x)+\alpha\Delta C_P(x) \tag{6}$$

$$\Delta C_P(x)=\Delta C_{P1}(x) \qquad x_0<x<x_1$$

$$\Delta C_P(x)=\Delta C_{P2}(x) \qquad x_1<x<x_2$$

ただし $C_{P0}(x)$ は母型の横截面積曲線を表わし，上記の関係は図中に示すとおりである。

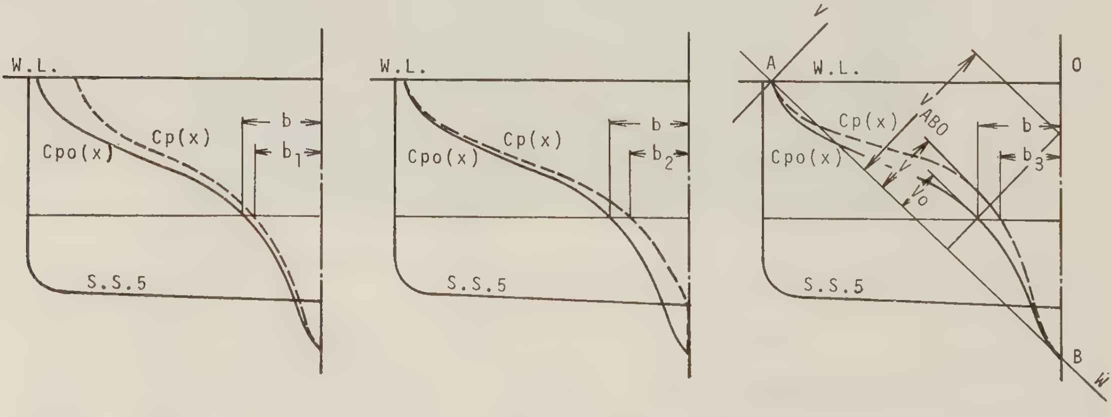
(2)　肋骨線の変形

肋骨線の変形についての林ら[9] の方法によれば，変形された肋骨線は横截面積曲線を変えた後に（$C_{P0}(x)\rightarrow C_P(x)$），その結果を用いて次の（7），（8）式で示される肋骨線の半幅長さ b_1 もしくは b_2 を用いて表現される。

$$b_1=b\frac{C_P(x)}{C_{P0}(x)} \tag{7}$$

$$b_2=\frac{\frac{B}{2}\{C_P(x)-C_{P0}(x)\}+b\{1-C_P(x)\}}{1-C_{P0}(x)} \tag{8}$$

ここで b は母型の肋骨線の半幅で，各変数の関係は図12のとおりである。ところが漁船は船体重量に対する機関重量の割合が大きいため，満載状態においても過大と思われる船尾トリムを付ける場合が普通なので，（8）式を


W.L.
Cpo(x)
Cp(x)
b
b1
S.S.5
W.L.
Cpo(x)
Cp(x)
b
b2
S.S.5
A
W.L.
O
Cp(x)
Cpo(x)
V
V_ABO
V
V0
b
b3
S.S.5
B
W

—b₁—　　—b₂—　　—b₃—

図 12　肋骨線の変形

Modification of frame line

トリム付船型に対しても適用出来るように変形すると(9)式が得られる。

$$b_2=\frac{\frac{B}{2}\{C_P(x)-C_{P0}(x)\}+b\left\{\frac{d(x)}{C_M d_0}-C_P(x)\right\}}{\frac{d(x)}{C_M d_0}-C_{P0}(x)} \tag{9}$$

ただし d_0 は平均吃水，$d(x)$ は各船長方向断面での吃水である。

ここで(7)，(9)式で表わされる肋骨線の変形パラメーター b_1，b_2 について，前者は主に水面近傍を，後者はキールセンター側の変形を意図したものである。しかしこれ以外に，粘性流体の観点からみればビルジサークルからプロペラトップに至る領域は境界層が特別厚くなり，またプロペラ前方上方域はプロペラの作動による圧力低下が顕著であることが伺える[8]ので，ここにポイントを置いた変形が出来れば興味深いと考えられる。

そこで次の検討を行なった。図中に示すとおり，各船長方向断面での水面位置をA，キールセンターをBとして，ABをw軸，これに垂直な軸をv軸とすると，母船型の横截面積 S_0 は(10)式で表現出来る。

$$\frac{1}{2}S_0(x)=S_{ABO}-\int_{A\to B}v_0\,dw \tag{10}$$

ただし S_{ABO} は図中の三角形 ABO の面積である。次にこの肋骨線の変形を(11)式を満すvによって行なうものとする。この際，水線面形状は不動と仮定する。

$$\frac{1}{2}S(x)=S_{ABO}-\int_{A\to B}v\,dw \tag{11}$$

(10)，(11)式を用いて其々 $C_{P0}(x)$ と $C_P(x)$ を表わし，さらに S_{ABO} を図中に示す v_{ABO} で表現すると，これらの関係からvは次のとおりとなる。

$$v=\frac{C_P(x)}{C_{P0}(x)}\ v_0+\left\{1-\frac{C_P(x)}{C_{P0}(x)}\right\}v_{ABO} \tag{12}$$

(12)式で表わされるvは(11)式を満しているので，これに従って変形される肋骨線は b_1，b_2 を用いる場合と同様，横截面積曲線 $C_P(x)$ を保証するものである。(12)式によれば，ある $C_P(x)$ を与えた時に v_0 と v_{ABO} が共に大きい位置でvと v_0 の差が大きくなるのであるから，この位置に対応するビルジサークルからプロペラトップに至る所で肋骨線の変形が強調されることが予想される。

さて母船型の肋骨線を変形する場合には，(7)，(9)(12)式で表示される b_1，b_2 及び v を其々単独で用いるだけでなく併用することもまた有用と考えられる。ただしvについてはこのままでは b_1，b_2 と共に用いることが出来ないので，vによる肋骨線の変形を行なった後に図中に定義する肋骨線の半幅長さ b_3 を逐一求めた。これらの3つの変形パラメーターと，林ら[9]の方法で用いられた重み係数 $\beta(x)$ を使って，(13)，(14)式で定められる肋骨線の変形を行なった。

$$b=\beta b_1+(1-\beta)b_2 \tag{13}$$

$$b=\beta b_3+(1-\beta)b_2 \tag{14}$$

(3)　変形結果

母型の横截面積曲線の変形は，まず変形開始位置をS.S.4 ($x_0=0.60$)，終了位置をプロペラ直前 ($x_2=0.9575$) として，この2点を固定した。次に変節点として $x_1=0.815$とその前後の合計3点を与え，其々の最大変形量 $\Delta C_{P\max}$ を最大変形位置での横截面積係数の5%とした。これによって得られる3例の横截面積曲線を図13に示す。CASE 1は肩張りの傾向を強くし，CASE 3はプロペラ直前を強調して削減した場合，CASE 2はその中間である。

肋骨線の変形については，$\beta(x)$ の関数形は表3に示す林ら[9]の表示式を用いた。変形を定める(13)式と(14)式及び $\beta(x)$ の組み合わせはこの表に示す3例をとり上げた。

実際に数値計算に供した船尾形状の系統的変形船の種類を表3に示す。また一例として，CASE 2，$\alpha=1.0$で定められる横截面積曲線を共有する3種類の船尾形状の変形船の正面線図を図14に表わす。

表3　船尾形状の系統的変形船の導出に用いたパラメーター

Parameters applied for systematic changes of aft hull forms

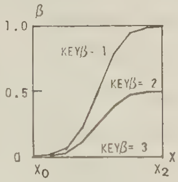
CASE	KEY γ	KEY β	α				
1	2	1	-0.25	0.25	0.50	1.00	1.25
	1	3	〃	〃	〃	〃	〃
	2	2	〃	〃	〃	〃	〃
2	2	1	-0.25	0.25	0.50	1.00	
	1	3	〃	〃	〃	〃	
	2	2	〃	〃	〃	〃	
3	2	1	-0.25	0.25	0.50	1.00	
	1	3	〃	〃	〃	〃	
	2	2	〃		〃	〃	

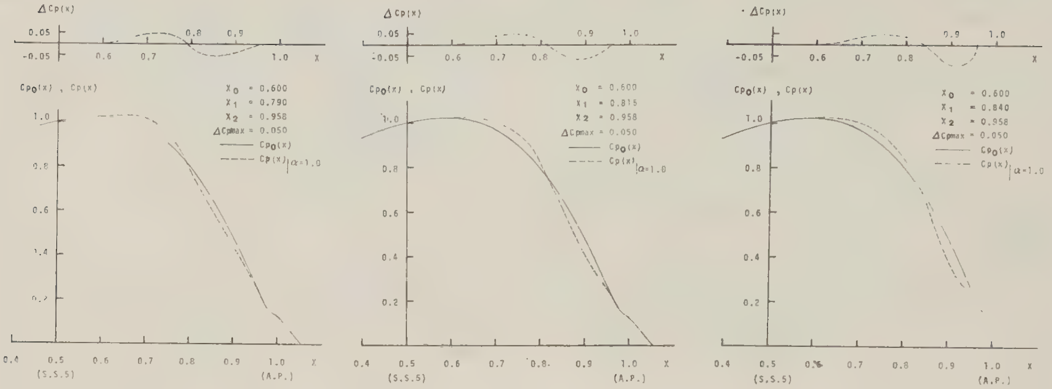
Note

CASE = 1 : X_1 = 0.790
CASE = 2 : X_1 = 0.815
CASE = 3 : X_1 = 0.840

KEYγ = 1 : $b=\beta b_1+(1-\beta)b_2$
KEYγ = 2 : $b=\beta b_3+(1-\beta)b_2$

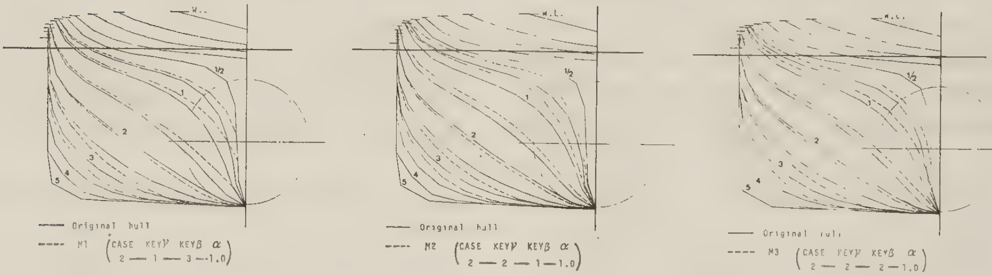
KEYβ = 1 : $\beta=\frac{1}{2}\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{2}\left(1-\cos\pi\left(\frac{X-X_0}{X_2-X_0}\right)\right)\right)\right)$
KEYβ = 2 : $\beta=\frac{1}{4}\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{2}\left(1-\cos\pi\left(\frac{X-X_0}{X_2-X_0}\right)\right)\right)\right)$
KEYβ = 3 : $\beta=0$





(a) CASE 1　　(b) CASE 2　　(c) CASE 3

図 13　母型の横截面積曲線の変形結果の一例
Modified sectional area curves for original hull


W.L.
1/2
1
2
3
4
5
Original hull
M1 (CASE KEYγ KEYβ α / 2 — 1 — 3 — -1.0)
M2 (CASE KEYγ KEYβ α / 2 — 2 — 1 — -1.0)
M3 (CASE KEYγ KEYβ α / 2 — 2 — 2 — -1.0)

(a) M1　　(b) M2　　(c) M3

図 14　船尾形状の系統的変形船の一例
Modified aft part for original hull

3.3　系統的変形船の推進性能の計算結果

船尾形状の系統的変形船型に対するプロペラ作動時の抵抗増加量 C_{Pt} と造波抵抗 C_w の計算結果を母型との差で図15，16に示す。なお境界層計算も含め計算はすべて模型船（$L_{PP}=2$ m）が $F_n=0.26$ で航走する状態で行なった。C_{Pt} の変化の全般的な傾向は，横截面積曲線の形状変形の変節点を変えたいずれの場合も同様で，プロペラ前方域の排水容積を船体後半部の前方領域に転置することにより C_{Pt} の軽減が可能であることが知られる。C_{Pt} は一般的に圧力抵抗成分が主要部を占めると考えられるため，この傾向は常識的なものである。その際，肋骨線の変形による効果は横截面積曲線を加減した場合よりも格段に小さく，C_w における改良と同様に横截面積曲線に着目した検討が重要であることが分る。C_w は全般的に程度の差は別にして増加の傾向にある。本計算法では C_{Pt} に対して自由表面影響を，また C_w にはプロペラの影響を入れていないので，これらが考慮された林ら[9]によるコンテナ船に対する高次の検討結果と直接比較を行なうことは出来ない。しかし林らより報告されている C_{Pt}，C_w が共に減少する領域は本計算結果では見られない。傾向としては，むしろ梶谷によって[18]計算された小型内航貨物船の改良例に近い。この母型の船尾形状の最適化を行なうのであれば，横截面積曲線については C_{Pt} にそれなりの効果が期待され，C_w 増加量の小さいCASE 2の変形具合を基準にしてその固定を行なうべきものと判断される。ただし，これは船首側の形状を不変とする条件下で船体後半部の変形を行なった場合の結果であり，実際の船型改良においては船体前半部の形状検討を同時に組み入れることが必要であることについては述べるまでもない。

一方，伴流利得の評価のためのYss 5や境界層特性がここで実施した肋骨線の系統的変形に対してどのような傾向になるのかを調べるために，横截面積曲線はCASE

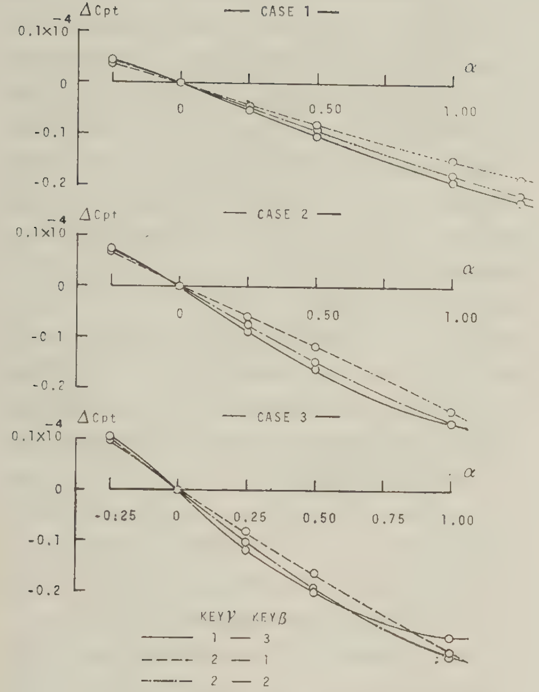


図 15　プロペラ作動による抵抗増加量の計算結果

Comparison of resistance due to the propeller suction (models modified systematically aft hull form)

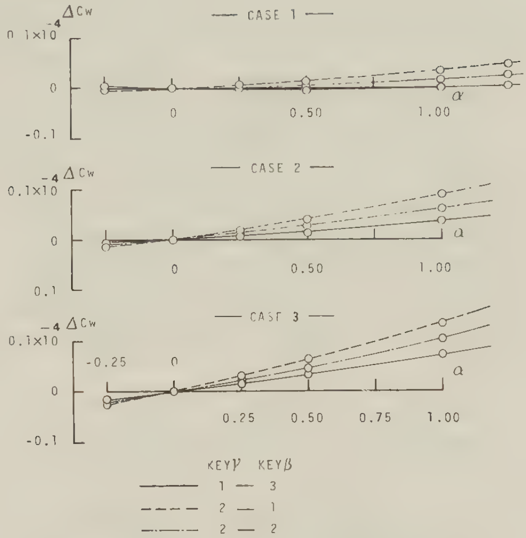


図 16　造波抵抗の計算結果

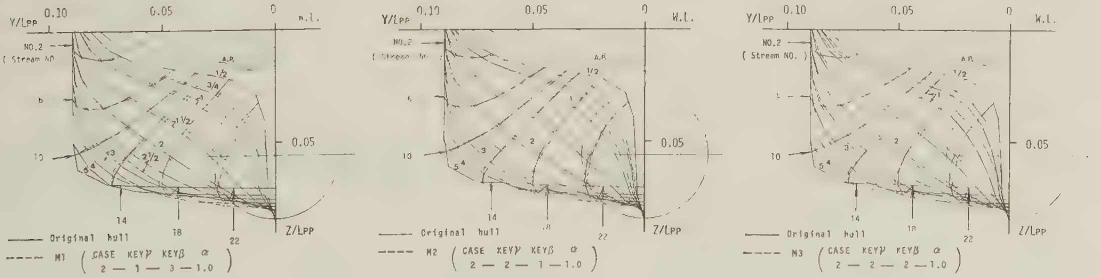
Comparison of wave making resistance (models modified systematically aft hull forms)

2 で $\alpha=1.0$ の変形を行ない，この条件下で肋骨線形状を変えた 3 例について計算を行なった。この 3 隻に対する船体表面ポテンシャル流線と S.S. 1 断面での境界層の運動量厚さ θ の分布を図 17，18 に示す。予想に反して其々の特性は大同小異である。これはここでの肋骨線の変形を母船型を基本形として行なっているために，流場に大きな違いが現われて来ないことによると考えられる。伴流利得や粘性抵抗において最適形状に近い母船型の船尾肋骨線を対象とする時は，ここで示した母型の特徴を残す系統的変形法の適応性は高いと想像されるが，最適形状に必ずしも近くない場合には母型と根本的に異なる形状を導入せざるを得ないと判断される。

そこで一つの検討事例として，V型とみられる母型の船尾肋骨線を船尾バルブ型に変えた場合に，伴流利得と境界層特性の改善が図られるか否かの計算を行ない，船尾形状の改良法についての考察を試みた。

3.4　船尾形状の改良の一手法

船尾形状の改良法において肋骨線については，肋骨線


Y/Lpp
0.10
0.05
0
W.L.
NO.2
(Stream NO.)
A.P.
1/2
3/4
1
1½
2
2½
3
4
5
6
10
14
18
22
0.05
Z/Lpp
Original hull
M1 (CASE KEYγ KEYβ α 2 — 1 — 3 — 1.0)
M2 (CASE KEYγ KEYβ α 2 — 2 — 1 — 1.0)
M3 (CASE KEYγ KEYβ α 2 — 2 — 2 — 1.0)

(a) Original hull and M1　(b) Original hull and M2　(c) Original hull and M3

図 17　船体表面ポテンシャル流線の計算結果の一例

Comparison of potential streamlines on the hull surface

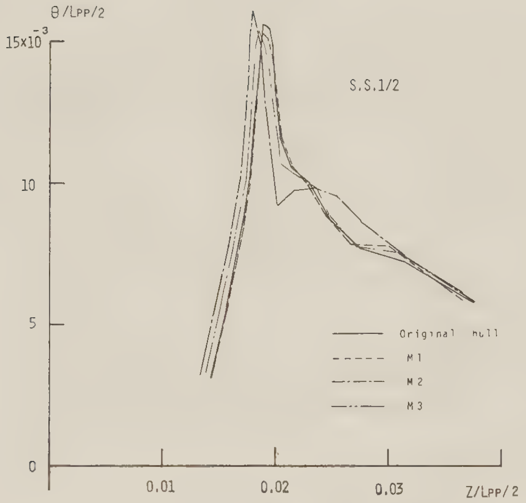


図 18　境界層の運動量厚さの計算結果

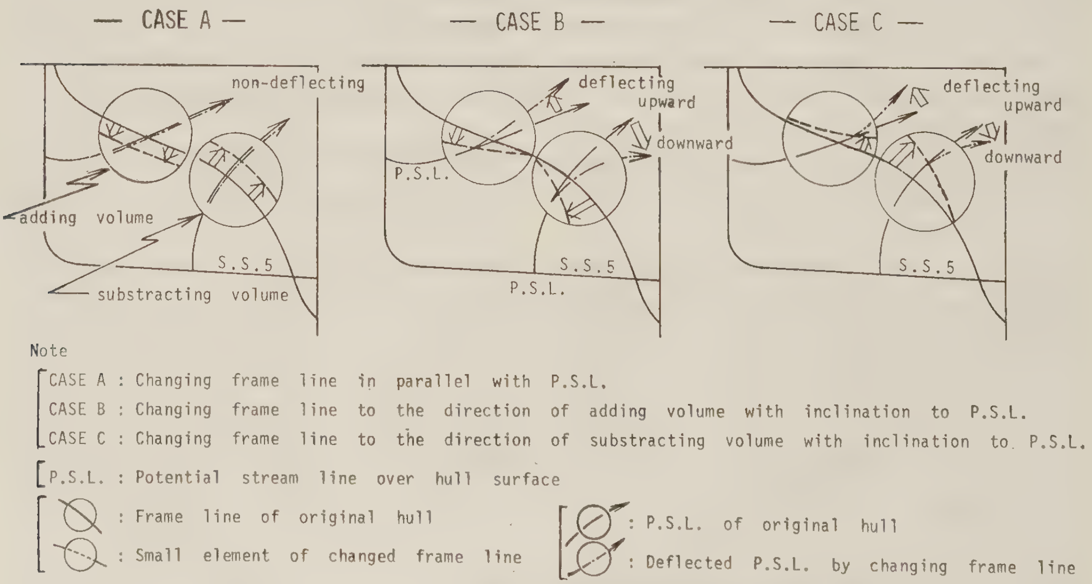
Comparison of momentum thickness in boundary layer (Original hull, M1, M2 and M3)

の変形に対する船体表面ポテンシャル流線の偏向特性を利用して考察を行なう。すなわち肋骨線の変形操作による流場の意図的な制御によって推進性能を向上させることを試みる。さて肋骨線と船体表面ポテンシャル流線の関係について図17で示した計算結果を詳しくみると，その物理的理由は別にして少なくとも次のことが言える。

船尾肋骨線の微小部分に着目すると，図19に示すようにその変形移動がその位置を通過する流線の流出方向と平行である場合（CASE A）は，排水量を付加ないしは削減のいずれにおいても流線の偏向は生じていない。これに対して微小部分の変形移動方向が流れ方向にある傾きを持つ場合には，流線はもとの流れ方向に対して偏向して流出する特性を持つ。すなわち，流線に対して傾きを持たせて排水容積を付加させる形状変形を行なう場合は，付加量の多い方へ流線がずれて行き（CASE B），逆に排水量を削る形状変形の時は，削減量の少ない方向に偏向している（CASEC）。

船型に対して十分な検討が行なわれていない従来型の漁船では，伴流分布の特徴は既述のとおり粘性伴流の多くはプロペラの上方を通過していき，プロペラ面に入る場合でも上方域に限られて，プロペラ面内下方域はポテンシャル流成分が支配的になっている。高木ら[19]の解説に従えば，このような流れではプロペラによるエネルギー回収が十分行なわれていないことになるのみならず，プロペラ面内での上下間の流速差が大きい傾向にあるためプロペラの非定常性能面での問題が起きやすい。

そこで伴流利得を向上するにはより多くの流線をプロペラ面内に集中させ，上下間の不均一性の解消のためにはプロペラ下方域に多くを流入させればよい。このことは Yss 5 の増加を図ることが必要であることを示しており，そのためには肋骨線変形に対する流線の偏向特性をもとにして考えると，まずプロペラ前方での船尾肋骨線



Note

CASE A : Changing frame line in parallel with P.S.L.
CASE B : Changing frame line to the direction of adding volume with inclination to P.S.L.
CASE C : Changing frame line to the direction of substracting volume with inclination to P.S.L.

P.S.L. : Potential stream line over hull surface

: Frame line of original hull
: Small element of changed frame line

: P.S.L. of original hull
: Deflected P.S.L. by changing frame line

図 19　肋骨線の変形に対する船体表面ポテンシャル流線の偏向モデル

Deflection model of potential streamlines due to variation of frame line

のキールセンターに至る下方部に排水容積を付加することにより対処出来るものと予想される。この変形は，結果的に漁船に多く見られるV型の肋骨線を船尾バルブ型に変えることと等価となる。そこで実際に母型の船尾下方部に排水量を付加して船型を変え，この変形船型の船体表面ポテンシャル流線を計算することによって以上の考え方が成り立つか否かを調べた。

その際，あまり非現実的な変形を行なうことは無意味なので，林ら[9]によって導かれた船型（M45）の船尾形状を参考にした。具体的にはまずM45の S.S. 1 での船尾肋骨線の半幅長さをプロペラ直径で無次元化した後，漁船の母型船のプロペラ直径に合わせて S.S. 1 での肋骨線と接合させた。また S.S. 1 前後の形状については，排水容積の付加量の前後方向に対する配分を表4に示す値とし，S.S. 1 で付加させた形状に概略相似な付加量を与えた後，前後方向にフエアリング修正を行なった。

以上の方法で求めた船型（MA）の船尾形状と船体表面ポテンシャル流線を図20に示す。母型の流線と比較して分るように，この付加変形は No. 18 の流線から内側に対して大きな影響を与え，予想どうりにその流向を内側に引張る作用を持つ。Yss 5 の増加量を図21に示すが，既述の方法によって導出した母型と相似な系統的形状変形船（M1, M2, M3）に比べて格段に大きい効果を与えることが分る。

表 4　肋骨線変形のための容積付加量の比率

The ratio of added volume to form modified frame line (MA)

	3	21/2	2	11/2	1	3/4	1/2
Added volume to each section	0	0.2	0.75	1.0	1.0	0.75	0.25

Note
Each figure shows the ratio to added volume at S.S.1 .

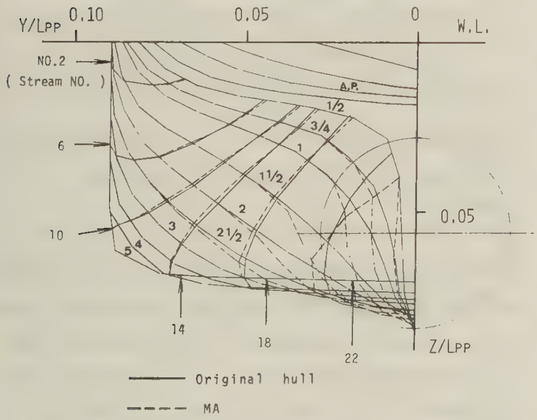
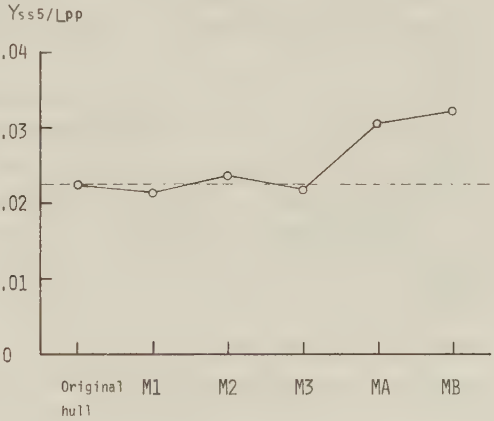


図 20　船体表面ポテンシャル流線の計算結果

Comparison of potential streamlines on the hull surface (Original hull and MA)

他方，排水量一定の条件及び横截面積曲線を変えない条件下での肋骨線の変形を行なうのであれば，プロペラ前方下方域に対する付加量と同じ容積をどこかで削減する必要がある。そこで，今度は付加変形を加えた部分の上方域を逆に削減する変形の検討を行なった。この場合この領域での境界層は，図18に示す運動量厚さの分布から分るように最も厚くなる性質を持つので，境界層特性の改善を意図してこの部分の変形の考察を行なうべきである。

この点については，田中教授[20]によって解説された低抵抗船型設計の指針が参考になる。これは境界層理論を用いて考察されたもので，その要点は，(1)ビルジサークルからプロペラトップに至る流線での境界層が厚くなる理由は，ここでのポテンシャル流線の縮少率 K_1 と流れ方向の圧力勾配が大きくなるためであり，(2)この境界層を薄くするには K_1 と圧力勾配を押えることが必要で，従って船体中央部でのビルジサークルの半径を大きくしたり，或いは船尾後半部を一点に収めずバトックフロー船尾等の導入により浸水長を大きくすることで低抵抗船の導出が可能である，の2点である。以下の考察でもこの考え方を参考にして検討する。



Note
CASE　KEY γ　KEY β　α
M1 :　2 — 1 — 3 — 1.0
M2 :　2 — 2 — 1 — 1.0
M3 :　2 — 2 — 2 — 1.0
MA :　Modified frame to add the volume
MB :　Modified frame to substract the volume

図 21　伴流利得率の計算結果

Comparison of wake gain (Original hull, M1, M2, M3, MA and MB)

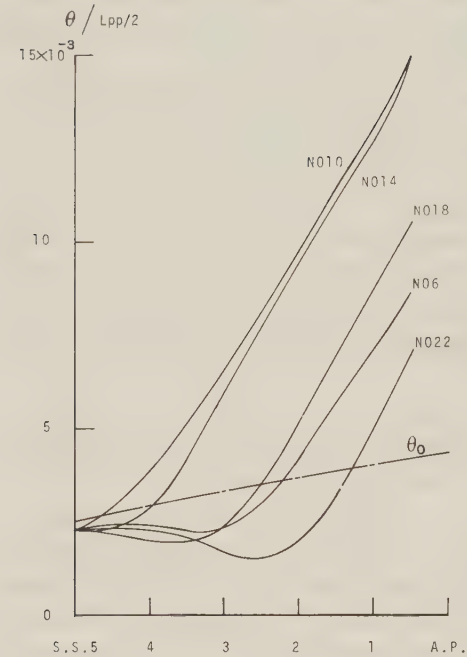


図 22　母型の境界層の運動量厚さ

Distribution of momentum thickness in boundary layer (Original hull)

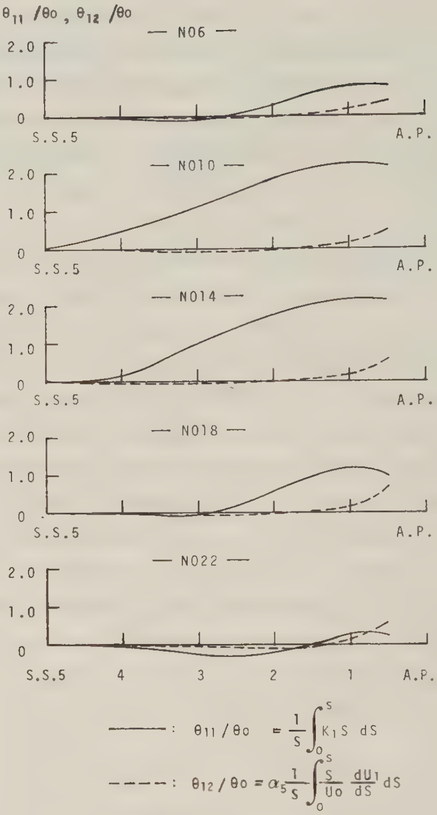


図 23　母型の境界層の運動量厚さの成分

Distribution of components of momentum thickness in boundary layer (Original hull)

まず境界層厚さとして運動量厚さ θ をとり上げて考える。田中一姫野の第一近似[15)]によれば，θ は(15)式で表現される。

$$\theta=\theta_0+\theta_1 \tag{15}$$

ここで θ_0，θ_1 は其々境界層の三次元性を表わす諸変数を微小とする摂動展開によって得られる第0，第1近似解である。θ_0 は平板解なので船尾形状とは無関係であるが，船尾形状の変形に対する θ の変化はすべて θ_1 に凝縮されてしまうので，ここではこの変数についてのみ考察すればよい。

θ_1 は(16)式で示される。

$$\frac{\theta_1}{\theta_0}=\alpha_4\frac{1}{s}\int_0^s\frac{U_1}{U_0}ds+\alpha_5\frac{1}{s}\int_0^s\frac{s}{U_0}\ \frac{dU_1}{ds}ds$$
$$+\frac{1}{s}\int_0^s K_1 s\,ds \tag{16}$$

$$\alpha_4=-\frac{n}{n+1},\quad \alpha_5=-H_0-2-0.339(l_n\ 10)\alpha_3$$

$$n=0.268,\qquad H_0=1.3,\quad \alpha_3=-0.166$$

ただし s は船体表面ポテンシャル流線に沿った座標であり，U_0 は船速，U_0+U_1 がポテンシャル流速である。

(16)式より船尾形状変形に対する θ の変化は，速度増加，圧力勾配，流線の拡大率の三つの作用によって決められることが分る。そこで，漁船船型の境界層における これら三項の寄与率を調べるために，田中－姫野法によって計算した母型の境界層の運動量厚さの発達具合を各ポテンシャル流線毎に表わして，各流線での其々の割合を比較した。この結果を図22，23に示す（図18は S.S. $\frac{1}{2}$ 断面での θ の分布)。ただし，第一項目の速度増加の寄与は他項に比べてオーダーが小さいので表示していない。これから，圧力増加の寄与は S.S. $1\frac{1}{2}$～1から後方でみられるだけであるのに対して，船底を流れる流線を除いて全体的に境界層の発達に対する K_1 の寄与は圧倒的に大きい。特にその傾向は，ビルジサークルからプロペラトップに至る領域で大きく，ここでの境界層を薄くするためには，K_1 に着目してこの値が小さくなる肋骨線の変形操作を行なうことが得策であることが分る。

そこでこの領域の排水容積を削減し，さらに K_1 を押える肋骨線の変形を次の考え方で行なった。図24は母型

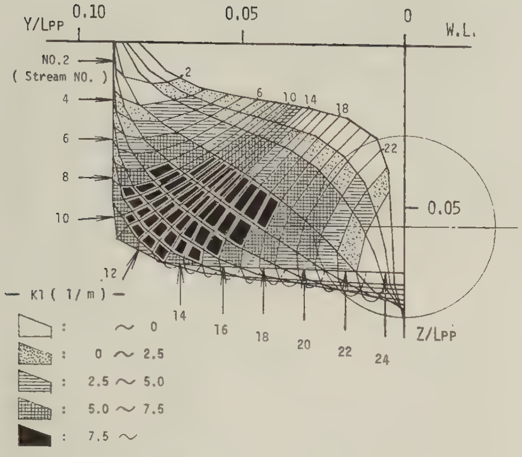
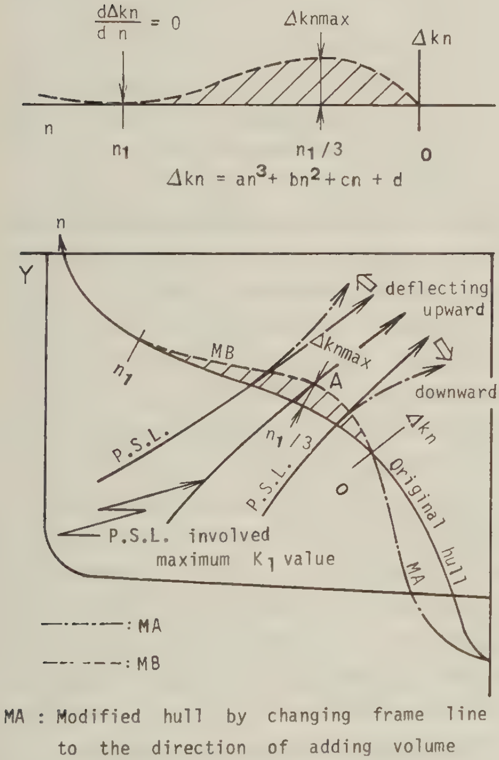


図 24　母型の船尾における K_1 分布
Distribution of K_1 on the aft part (Original hull)


$\frac{d\Delta kn}{dn} = 0$
$\Delta kn\max$
Δkn
n
n_1
$n_1/3$
0
$\Delta kn = an^3 + bn^2 + cn + d$
n
Y
deflecting upward
downward
MB
n_1
$\Delta kn\max$
A
$n_1/3$
Δkn
P.S.L.
P.S.L.
0
Original hull
MA
P.S.L. involved maximum K_1 value
-·-·-·-: MA
-·- ---: MB

MA : Modified hull by changing frame line to the direction of adding volume

MB : Modified hull by changing frame line to the direction of substracting volume

図 25　境界層の制御を図る肋骨線の変形
Method on the modification of frame line to control boundary layer

の船尾における K_1 の分布を表わしたものである。これより No. 11の流線をピーク値として No. 6 からNo. 20に至る領域で K_1 は大きくなり，またその分布形状に大変大きなピークが生ずることが分る。そこで図25に示すように，n をガース方向に沿った座標軸とすると，この分布で頂点となる流線，それは境界層が最も発達している流線でもあるが，この流線を境にして上方域では肋骨線の傾き $\frac{\partial y}{\partial n}$ を大きく，逆に下方域では $\frac{\partial y}{\partial n}$ を小さくする形状変形を行なうものとする。この時，図19に示した肋骨線の変形に対する流線の偏向特性が適応出来るものとすると，この上方域の流線は外側へ，逆に下方の流線は内側へ曲げられるので（図25），K_1 についてピーク値を持つ流線近傍では拡がり流れの作用を受ける結果，その値を押えることが可能になると推察される。この場合，下方域での流線の内側への偏向は，Yss 5 の増加に結びつくことが予想されるので伴流利得の向上効果も期待される。

そこで船尾下方部の付加変形を行なった船型（MA）に対して削減変形を加え，以上の考え方が有効か否かについて調べた。その変形方法についてはまず肋骨線の削減量の形状を図25に示すように，n を変数とする三次曲線で表示出来るとし，この形状を基本形として S.S. $1\frac{1}{2}$ と S.S. 1 の変形を行なった後，前後位置のフエアリングを加えた。この場合，削減形状の最大点（図中A）を K_1 のピーク値を持つ No. 11の流線に対応させることが最も有効と考えられるが，フエアリングの観点から No. 14の流線に合わせた。また削減容積は，下方域での付加量と同一にするべきであるが，ここではこの効果が分ればよいのでこれにとらわれず半分程度とした。

この手順に従って肋骨線の削減変形を試みた船型（MB）についての流場計算を行なった。まず船体表面ポテンシャル流線については，図26に示すように意図したとおりに K_1 のピークを持つ流線を中心として，上方域で外側へ，逆に下方域で内側への偏向がみられ流線の制御が行なわれている。また K_1 の低下に基づく θ の減小は，図27，28に示すようにビルジサークルを通る流線において生じていることが分る。

ただし，この変形によって No. 18から No. 22の流線での境界層が厚くなっているが，これは No. 18の流線を内側に過大に偏向したため，逆にここでの K_1 が増加したことによる。これについては肋骨線の削減量の最大となる位置の内側の形状の傾きを小さくし，逆に外側を大きくする変形によって対処出来るものと推察される。

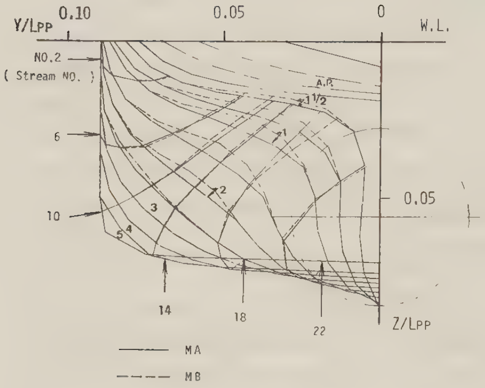


図 26　船体表面ポテンシャル流線の計算結果
Comparison of potential streamlines (MA and MB)

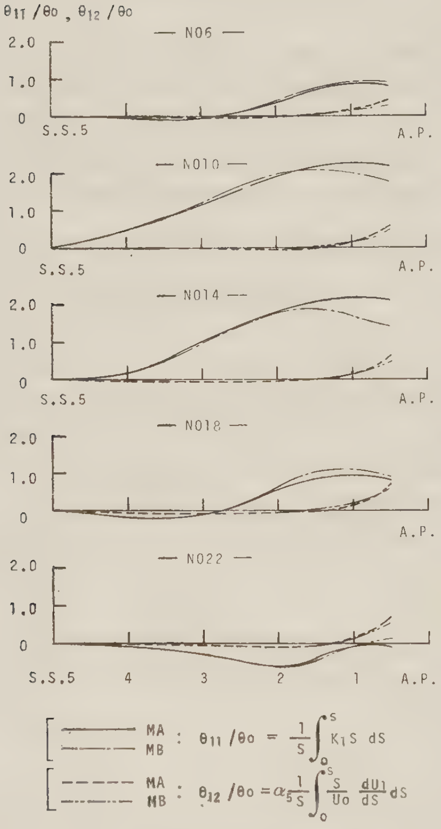


図 27　境界層の運動量厚さの成分
Comparison of components of momentum thickness in boundary layer (MA and MB)

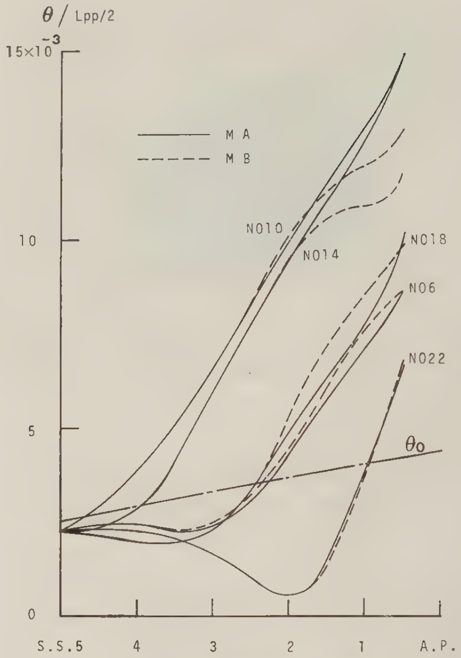


図 28　境界層の運動量厚さの計算結果
Comparison of momentum thickness in boundary layer (MA and MB)

船尾下方部の付加とその上方域での削減のうち，特に前者の変形については船尾肥大度を大きくする傾向にあるため，粘性圧力抵抗の増加を伴う傾向にある。またプロペラの作動による抵抗増加量については，この変形ではプロペラの圧力低下を強く受けるプロペラ直前方域での船体表面法線ベクトルの船長方向成分が増加するため，後者の変形によって相殺される可能性があるものの大きくなる危険性があると考えられる。

船尾形状の改良においてはこれらのことを考察した総合化を必要とするが，ここで考察を行なった肋骨線の変形に対する船体表面ポテンシャル流線の偏向特性を用いる改良法によれば，伴流利得の増大と境界層の発達を押える効果が得られると言えよう。なおここでの肋骨線の改良検討は母型を基本形として行なったが，最適化を含む船尾形状の改良においては，まずプロペラ作動時の抵抗増加と造波抵抗の改善を図る横截面積曲線の抽出を行ない，次いでこれを固定して，ここで考察を行なった肋骨線の改良方法を加える手順をとればよい。

4. 結　　言

船尾形状に関連する推進性能の評価を図る数値計算を援用して，漁船の船尾形状の改良法についての検討を行

なった。また横截面積曲線と肋骨線を系統的に変えて推進性能の変化の具合いを調べる方法と共に，肋骨線の変形に対する船体表面ポテンシャル流線の偏向特性を用いた改良法を提案してその有効性を示した。本論文は試検討段階のもので，その実用化のためには理論の見直しや数値計算法の改良，或いは模型実験データを加えた定量的な吟味が必要である。これらを今後の課題として，従来必ずしも十分に顧りみられることのなかったこの分野に取り組む所存である。

本論文では推進性能を平水中での性能問題として議論を行なっているが，漁船を対象とする場合は波浪中での性能検討がより重要となろう。しかしながら，漁船の総合性能の一側面の評価のために，また波浪中での諸問題に対する前段階の議論として平水中に限定した議論は必要不可欠であると考えられる。

本論文の考察は，大阪大学工学部の田中一朗教授による研究資料よりヒントを得て行なったものである。先生より貴重な資料を御紹介頂いたことを記して御礼申し上げる。本研究の実施においては，当研究所船体性能研究室の山越康行室長より全面的な理解と格別の配慮を承ると共に，御討論を頂いた広島大学工学部の土井康明氏，実験に協力を頂いた上海水産学院の章可畏氏に深謝する。本論文のまとめに際して，東京大学工学部の梶谷尚教授，大阪大学工学部の鈴木敏夫助教授，広島大学工学部の茂里一紘助教授より有益なご助言を承った。ここに重ねて深謝する。計算は農林水産研究計算センターACOS 850によった。

参考文献

1）高橋洋二，田中満佐人：省エネルギー漁船船型の開発，石川島播磨技報，第18巻3号（1978）

2）荻原誠功，高橋洋二，神代頴明：省エネルギ形まぐろ延縄漁船の開発，石川島播磨技報，第21巻1号（1981）

3）高幣哲夫，小倉理一：船型開発と試験水槽シンポジウムテキスト，第2部第3章　回流水槽の活用，日本造船学会試験水槽委員会（1983）

4）小倉理一，松井志郎，玉島正裕，西本仁：新型回流水槽の諸特性と抵抗試験について，西部造船会会報，第64号（1982）

5）日本造船研究協会：SR 183 研究部会，船尾振動・騒音の軽減を目的としたプロペラ及び船尾形状の研究報告書，No. 342（1981），No. 348（1982），No. 358（1983）

6）玉島正裕，西本仁，小倉理一，茂理一紘：静水中における高速肥大船型の船首近傍流れの実験的調査，西部造船会々報，第68号（1984）

7）上田隆康，高橋　肇，管井信夫，横尾直幸，鈴木茂：漁船の推進性能とプロペラ起振力について，船舶技術研究所報告，第14巻4号（1977）

8）Miyata, H., Lin, Y., Hino, T., Fujita, S.: On the Optimization of the Aft-Part of Fine Hull Forms（First Report），関西造船協会誌，第177号（1980）

9）Lin, Y., Kajitani, H., Miyata, H., Kanai. M.: On the Optimization of the Aft-Part of Fine Hull Forms（Second Report），関西造船協会誌，第179号（1980）

10）Lin, Y., Kajitani, H., Miyata, H., Takeuchi, S., Adachi, H.: On the Optimization of the Aft-Part of Fine Hull Forms（Third Report），関西造船協会誌，第181号（1981）

11）荻原誠功：船体まわりのポテンシャル流れの計算とその応用，石川島播磨技報，第23巻4号（1983）

12）土屋　孟：漁船船型の有効馬力に関する統計解析，日本造船学会論文集，第132号（1972）

13）中武一明，山崎隆介：肥大船自航試験の理論的取扱い，日本造船学会論文集，第138号（1975）

14）池畑光尚：流場データを用いた船の推進性能推定法，関西造船協会誌，第163号（1976）

15）田中一朗，姫野洋司：3次元乱流境界層の第1近似理論とその応用，日本造船学会論文集，第138号（1975）

16）姫野洋司，石井立志：境界層理論による粘性抵抗の推定，日本造船学会論文集，第154号（1983）

17）森　正彦：船型開発と試験水槽シンポジウムテキスト，第2部第1章，船型試験データの設計への応用，日本造船学会試験水槽委員会（1983）

18）梶谷　尚：省エネルギー内航船設計のための技術指導書，第4章，船型の検討，日本中型造船工業会（1982）

19）高木又男，北沢孝宗：伴流中におけるプロペラの効率に関する二，三の考察，関西造船協会誌，第167号（1977）

20）田中一朗：低抵抗船型について，第1回推進性能研究委員会資料（1983）

On the Method to Improve Aft Hull Form of Fishing Boats

By

Toshihiko KAWASHIMA

Summary

In order to improve, at the pre-design stage, the aft form of fishing boats for fuel oil saving, the practical prediction method is proposed.

The method is carried out with numerical calculation, and it is composed of various computer programs. They are potential double model flow calculation by Hess-smith's method, thrust deduction calculation by Lagally's theorem with Dickman's propeller model, potential hull surface streamline calculation, three dimensional turblent boundary layer calculation by Tanaka-Himeno's method, and wave making resistance calculation by modified Michell's theory.

By using these systematized calculation programs, various characteristics of propulsive performance, which are closely related to the aft form of ships, are evaluated analytically and synthetically.

Furthermore, a program to change systematically both prismatic curve and frame lines of aft hull part is included in this system, and the relation between the aft form and the propulsive performance is effectively investigated by utilizing this optional program.

As an application of this numerical calculation, the method to improve aft hull form of tuna fishing boat is discussed.

水工研報告 6
1985 pp. 243～251

漁船機関におけるA/Cブレンド油の使用についてーII

―以西底曳網漁船における実績―

小田健一*

目次

1. まえがき……………………………… 243
2. 以西底曳網漁船……………………… 243
3. 低質燃料の使用実態………………… 243
4. 対象船と使用燃料…………………… 244
5. 低質燃料と機関性能………………… 245
  5.1 主機関出力……………………… 245
  5.2 排気温度………………………… 245
  5.3 燃料消費率……………………… 245
6. 低質燃料と機関のメンテナンス…… 245
7. 低質燃料と潤滑油の劣化…………… 247
8. 低質燃料の経済性…………………… 248
  8.1 燃料費…………………………… 248
  8.2 ランニングコスト……………… 248
  8.3 メンテナンスコスト…………… 248
  8.4 イニシャルコスト……………… 248
9. あとがき……………………………… 248
  参考文献……………………………… 248
  Summary……………………………… 251

1. まえがき

2度にわたる石油ショックにより，漁業資材とりわけ燃料価格の高騰が著るしく，漁業支出が大幅に増大してきた。ここ1～2年は，原油需給の緩和による値下りから，漁船の燃料の主体をなすA重油価格も一時期にくらべれば安定しているものの，魚価の低迷と漁獲量の減少などにより漁業収入が伸び悩む中で，漁業支出の20～30％を占める燃料費は人件費とならんで，漁業経営を圧迫する主たる要因となつている。

漁業収入の大幅な増大が期待できない中で，経営の改善をはかるため漁船の省エネルギ化，省経費化が強く求められている。省経費の方策の一つに，既に商船で実績のある安価な低質燃料の導入が検討され，多くの漁業経営者の注目を集めているが，環境条件，特に漁港におけるC重油の供給体勢が未整備のため，現在のところ低質燃料はごく一部の特定の漁船についてのみ使用されているにすぎない。

ここでは，100～200トン級の漁船で初めて低質燃料を本格的に導入して操業している以西底曳網漁船の実態をもとに，漁船における低質燃料の使用について検討を加えてみた。

2. 以西底曳網漁船

以西底曳網漁業は，東経128度30分以西の東シナ海，黄海で操業する底曳網漁業で，2隻の船で1ヶ統の網を曳く2そう曳きが操業の特徴となつている。長崎，福岡，戸畑，下関を基地に439隻の漁船があり，1そう曳きの2隻を除く437隻は総トン数100～220トン（旧トン）の範囲にあり，うち40％が114トンまたは119トン型である。主機関は6気筒でシリンダ径260mm以下の中速機関が多く，一部に280mm以下の低速機関もみられる。

操業は，主船と従船が一組になりそれぞれが持つ網を交互に使用して，投網，曳網，揚網を昼夜の別なく繰り返しており，年間出漁日数は300日に及びその間主機関は連続して使用されるため，その稼働時間は7,000時間以上と他の漁業種にくらべ苛酷な条件下におかれている。

3. 低質燃料の使用実態

漁船に低質燃料を使用する場合に解決の必要な問題として，低質燃料の入手，燃料の混合，タンク等用の機関室内のスペース，燃料の移送，前処理，加熱，機関の低質燃料対策などがあげられる。

以西底曳網漁船の場合，運搬船も含めて福岡，長崎などの都市の同一基地に出入港し，一定の隻数がまとまっ

---

* 漁船工学部

てあることからC重油の入手が可能となった。船規模が総トン数100トン以上で，漁船としては比較的大型に属するため，機関室内に低質燃料用サービスタンクや燃料の前処理機器類を設けることが可能であった。また，操業パターンからみて主機関が無負荷となる時間が1日に4～5回，1回30分程度と短かいため発停時を除きA重油への切り替えを行っていないことや，出漁海域の海水温度が冬期でも比較的高いなど，低質燃料の取り扱いには有利な条件があった。こうした中で，陸上またはバージブレンドにより，漁船の要求する比率でA重油とC重油のブレンド油の供給が可能となったため，一部の水産会社の船で56年夏ごろよりA/Cブレンド油の使用が開始された。

船により，A/Cのブレンド比を8/2程度としてA重油仕様のままでA重油に代えて主機関，補機関に使用している場合と，5/5程度として低質燃料対策をとり（改造船は経済的に可能な範囲で）主機関に（一部では補機関も含め）使用している例があるが，ここでは後者について実態調査を行ない検討を加えた。

4.　対象船と使用燃料

低質燃料を使用している以西底曳網漁船の一例として，低質燃料仕様で建造された新造船の例としてA丸，B丸の一組を，就航後に低質燃料仕様に改造された例としてC丸，D丸の一組をとりあげた。その主要目を表1に，低質燃料対策を表2に示す。

A丸，B丸は56年9月に就航してA重油にて1航海した後，2航海目に主機関に低質燃料を使用した。このとき，燃料が直接関与しない部分であるが機関にトラブルがあったため3航海目は一旦A重油に戻し，再び低質燃料で4～6航海した後57年7月に機関の開放，整備を行った。57年8月から58年7月までの1～7航海は低質燃料を使用した。

C丸，D丸は55年8月から56年7月までの1～7航海はA重油を使用し，56年7月の機関開放時に低質燃料仕様に改造され，56年8月から57年7月までの1～7航海は主機関に低質燃料を使用した。

A/Cブレンド油は流通過程の末端でできる商品であるため，その性状は今まで殆ど公表されていない。対象船は，出港前に陸上にてA重油とC重油を混合したブレンド油の給油を受け，1航海で不足する燃料は運搬船で運ばれ洋上で補給される。57月7日から58年6月までの1～6航海につきB丸の帰港時に採取したA/Cの比率が5/5のブレンド油の性状の平均値と標準偏差及び，57年7月のドック時にC丸より採取した6/4のブレンド油の性状を表3に示す。平均的なA重油及び180cStのC重油の性状とブレンド比から推定したブレンド油の性状と分析値とはほぼ一致しており，ブレンド比は正確で比較的バラツキの少ないブレンド油が供給されていたことがうかがえる。機関入口の燃料フィルタより採取したため，燃料清浄機を通過後のサンプルだが，スポットテストで判断した混合安定性についても，2ヶ月間の航海の範囲内では問題はなかつた。以西底曳網漁船は運搬船も含め，常時同一の基地で同一の石油販売業者から給油を受けていることも混合安定性が良好であった要因の一つにあげられる。

表1　低質燃料使用の以西底曳網漁船の一例

Tow boat trawlers using lower quality marine fuel

船　　名		A丸・B丸	C丸・D丸
総トン数（旧）	GT	114	149
建造年	（改造年）	56	54（56）
主機関	シリンダ数	6	6
	径　（mm）	260	260
	行程（mm）	330	320
	回転数　航走時	680	690
	（rpm）　曳網時	500～600	620～670
	冷却方式	清水	海水
	潤滑油量(ℓ)	1500	1400
	潤滑油のT.B.N.(mgKOH/g)	26.8	22
補機関	出力（PS）	115	145
	回転数(rpm)	1200	1200

表2　低質燃料対策

Counterplan for lower quality marine fuel

項　　　目	A丸 B丸	C丸 D丸
燃料清浄機	有	有
排気弁ステライト盛，ローテータ	有	有
排気弁座冷却	有	無
燃料弁冷却	有	無
機関清水冷却	有	無（温調弁）
燃料ろ器のメッシュアップ	有	無
燃料精密ろ器	無	有
燃料サービスタンクヒータ	有	無
燃料機関入口ヒータ	有	有
潤滑油のグレードアップ	有	有

5. 低質燃料と機関性能

低質燃料使用時の機関性能の変化をA重油使用時と比較するため，機関日誌に記録されたデータの解析を行った。

5.1 主機関出力

燃料消費量より主機関出力を推定すると，A丸，B丸は航走時800 PS，曳網時450～500 PS，C丸，D丸はそれぞれ950 PS，600～650 PS程度となり，主機関の規模はほぼ等しいが後者が船規模，漁具規模ともにまさるため，主機関の負荷率が高くなっている。

5.2 排気温度

航走時，曳網時それぞれにつき，A重油使用時と低質燃料使用時で主機関の回転数が等しいところをとり排気温度を比較した。A丸，B丸では航走時，曳網時とも有意差はなかったが，C丸，D丸ではいずれも有意となり，図1のように低質燃料では690rpmの航走時で8～30℃の，600rpmの曳網時で14℃の上昇がみられた。これは，C丸，D丸の機関の負荷率が高いことと，燃料弁が無冷却のため汚れが多かったことが原因の1つと考えられる。

5.3 燃料消費率

A丸，B丸の各航海毎の燃料消費量を発熱量によりA重油に換算して主機関の場合を図2に，補機関の場合を図3に示す。主機関では，A重油で運航した処女航海の燃費が少なく，低質燃料を使用した2航海目は途中で一度帰港したことにより航走時間の割合が大きくなったために燃費が増加した。A重油を使用した初年度の3航海目とそれ以降の各航海とを比較してみると，低質燃料による燃費の増加はみられない。補機関では，主機関に低質燃料を使用した時に8％の燃費の増加がみられた。これは加熱用ヒータ3 kW分に相当する。

一方，C丸，D丸では燃費を主機関と補機関に分離して求めることができなかったので，合計して図4に示す。図中で燃費が160ℓ/hを越える航海は，他の航海と対象とする魚種が違い，使用する網規模と曳網速度も異なるためこれを除外したA重油使用の6航海と低質燃料使用の6航海で比較したところ有意差があり，増設した燃料加熱用ヒータ分の2倍に当る9％の燃費増がみられた。さらに，操業条件や船底，プロペラの汚損状況が等しいと思われるドック直前の7航海目の詳細なデータが得られたので，操業時について低質燃料使用時と前年のA重油使用時で比較したところC丸で6％，D丸で8％の燃費増がみられ，ヒータの使用による補機関の燃費増を差引いて低質燃料による1.5～3.5％程度の主機関の燃費率の増加の可能性がうかがわれた。

表3　低質燃料の性状

Specification of lower quality marine fuel

項　　　　　目		ブレンド比5/5		ブレンド比6/4
		平均値	標準偏差	
比　　　重	15/4℃	0.9014	0.0057	0.8939
引　火　点	℃	81	3	72
粘　　　度	@50℃ cSt	12.57	1.03	10.13
灰　　　分	wt%	0.03	0.00	0.01
残留炭素分	wt%	4.76	0.35	5.58
硫　黄　分	wt%	1.49	0.15	1.37
水　　　分	vol%	0.02	0.01	0.05
流　動　点	℃	−15	6	−20
セタン指数		45.7	1.4	46.0
真発熱量	kcal/kg	10022	43	10040
ASTM D 2781 スポットテスト		1	0	1

6. 低質燃料と機関のメンテナンス

各船とも年に一度夏期の切りあげ時期に機関の開放，整備を行っており，低質燃料を使用する様になっても定期整備の間隔はA重油のときと変化はない。

1年間低質燃料使用後の機関開放時に，A丸・B丸で

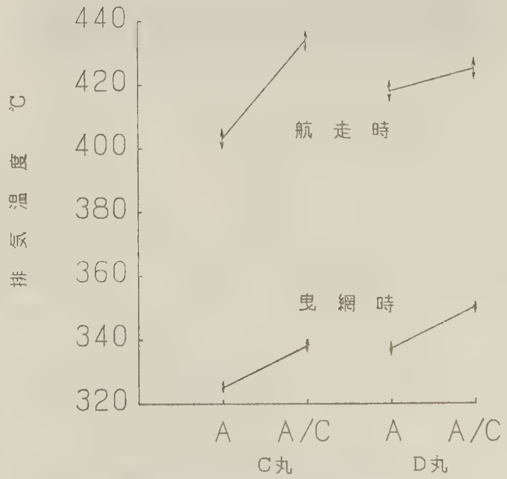


図1　燃料油種と排気温度

Fuel oil grade vs. exhaust temperature

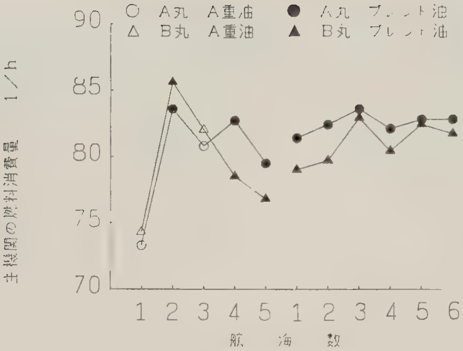


図 2　A丸・B丸の主機関の燃料消費量
Fuel consumption of propulsion machinery (A-maru and B-maru)

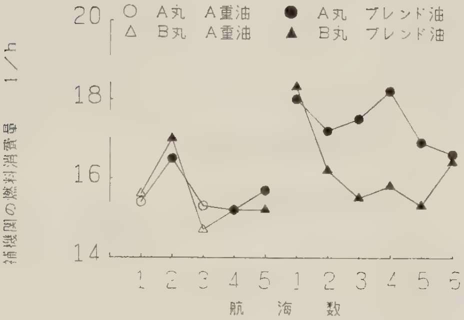


図 3　A丸・B丸の補機関の燃料消費量
Fuel consumption of auxiliary machinery (A-maru and B-maru)

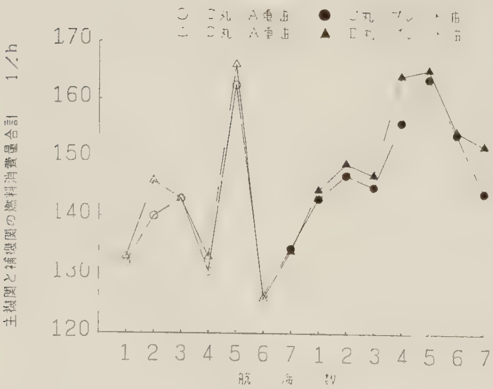


図 4　C丸・D丸の燃料消費量
Fuel consumption (C-maru and D-maru)

は図5のように吸排気弁に高温腐食がみられたものの，燃料弁の汚れは少なく，後述のように潤滑油の管理状態が極めて良好であったため図6のようにリング溝の炭化物も少なく，摩耗は圧縮リングのT寸で0.01～0.04mm/1000h，シリンダライナの上部で0.002～0.006mm/1000h程度と特に問題はなく，A重油に対して機関のメンテナンス間隔の短縮の必要性は必ずしも明確にはならなかった。これは新造時より低質燃料仕様であることと，機関の負荷が比較的低いことによると思われる。ただし，船底の燃料タンクの掃除間隔が，A重油の2～4年から低質燃料では1～2年に短縮されることが判明した。

一方，C丸，D丸の開放時には図7，図8のように燃料弁の汚れ，吸排気弁の高温腐食，弁のシート面のカーボンかみ込みによる圧こんがみられた。ピストンは図9のように第一リング溝の炭化物付着量はやや多いもの

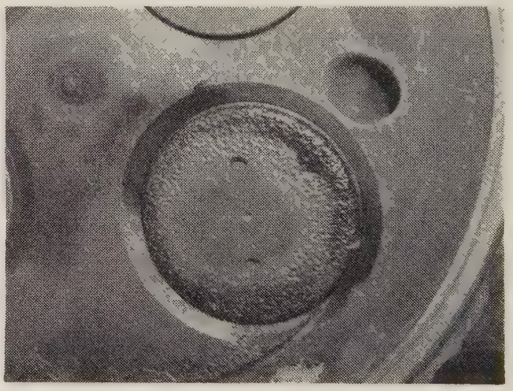


図 5　B丸の燃料弁と排気弁
Fuel valve and exhaust valve (B-maru)

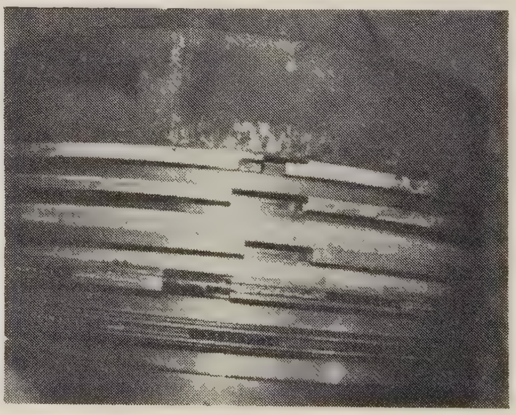


図 6　B丸のピストン
Piston (B-maru)

の，アンダークラウンやクランクケース内は清浄に保たれており，シリンダライナ（クロムメッキ）やクランク軸，軸受メタル等の摩耗に異常はみられなかった。

低質燃料の使用により，排気弁の摺り合わせと過給機の分解掃除がA重油使用時の1年から半年に，燃料弁の手入れが2航海から1航海に短縮され，1年毎に一部交換していたピストンリングが全数交換となった。

このように，A丸，B丸とC丸，D丸で低質燃料による機関のメンテナンス間隔の短縮に差が生じたのは，表2の低質燃料対策と表4のように船規模，漁具規模による機関の負荷率の差によるものと考えられる。

7.　低質燃料と潤滑油の劣化

低質燃料の使用による潤滑油の劣化を調査するため，A丸，B丸から各航海毎に入港時に主機関の潤滑油を採取した。運転時間の経過による粘度の変化を図10に，0.1μm ミリポアフィルタで捕集した石油エーテル不溶分の変化を図11に，過塩素酸法による全塩基価の低下を図12に示す。潤滑油性状が極めて良好に保持されていたのは，機関の平均的な負荷率が比較的低く，保油量が多く，そして何より図13に示す様に潤滑油消費（補給）量がかなり多かったことによると考えられる。なお，本船のバイパス浄油装置は遠心式こし器のみで，潤滑油清浄機は持っていない。

A丸，B丸の燃料単位消費量当りの潤滑油の不溶分増

表 4　平均有効圧力と出力率

Mean effective pressure and piston speed.

	A丸・B丸 Pme kg/cm^2	 Pme×Cm kg/cm^2・m/s	C丸・D丸 Pme kg/cm^2	 Pme×Cm kg/cm^2・m/s
航走時	10	75	12	90
曳網時	7.7〜7.9	42〜52	8.5〜8.6	57〜61

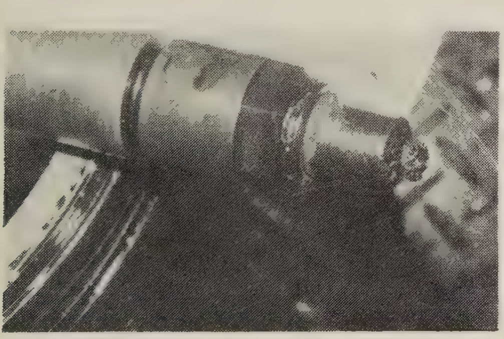


図 7　D丸の燃料弁の汚れ

Fuel valve (D-maru)

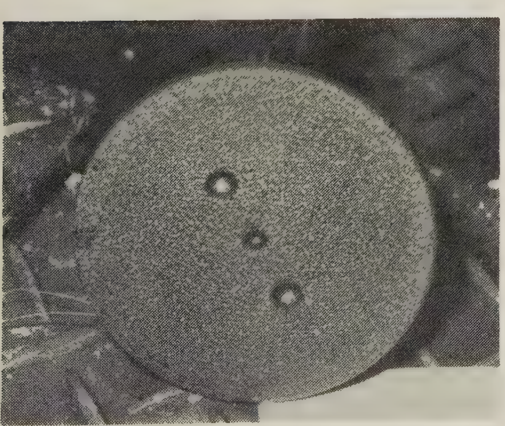


図 8　D丸の排気弁の高温腐食

Exhaust valve (D-maru)

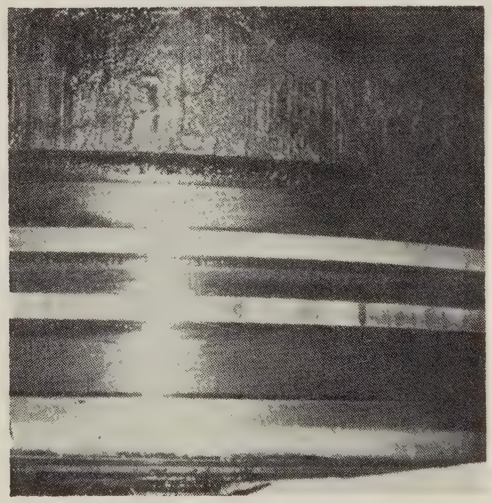


図 9　C丸のピストン

Piston (C-maru)

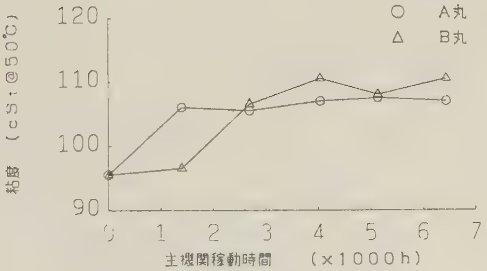


図 10　潤滑油性状変化（粘度）

Viscosity of lubricating oil

加率，アルカリ消費率を求め，以西底曳網漁船の海水冷却方式の中速機関を軽油で運転した場合及び，A重油使用のかつお，まぐろ，いか釣漁船7隻（いずれも海水冷却）の平均値と比較して表5に示す。低質燃料の場合，潤滑油に混入する不溶分は軽油に対して4～6倍に増加するが，A重油の値をやや下まわっている。これは低質燃料対策により良好な燃焼状態が維持できたためと思われる。

A丸，B丸の実績から，過塩素酸法による潤滑油の全塩基価の下限を10mgKOH/gとすれば，全塩基価20レベルの潤滑油を使用して，平均出力当り3.2ℓ/PSの保油率があり，潤滑油消費量が燃料消費量の0.4%ある清水冷却機関では，5/5のブレンド油を使用しても7,000時間後の全塩基価は13mgKOH/g，ミリポア不溶分も3.8wt%程度の性状を保つものと推定され，ドックからドックまで1年間無更油が可能と判断された。

一方，C丸，D丸では56年の機関開放時にサンプタンクの潤滑油の交換がなされなかったため，C丸の不溶分が4.9wt%，粘度増加率が82%，D丸は4.7wt，47%に達していた。しかし，全塩基価がそれぞれ5.7mgKOH/g，9.8mgKOH/g残存していたため，機関の摩耗や清浄性には特に問題は生じていなかった。

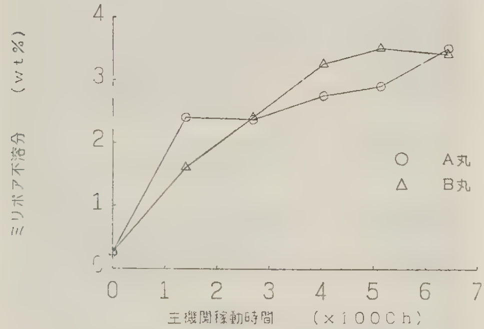


図 11　潤滑油性状変化（不溶分）
Insolubles in lubricating oil

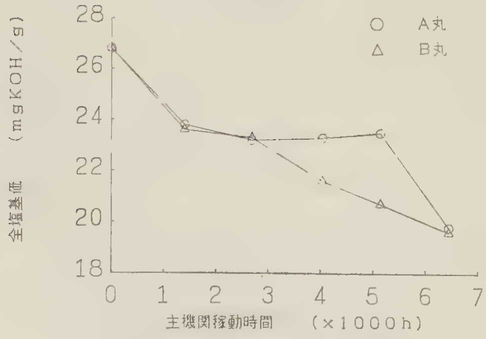


図 12　潤滑油性状変化（全塩基価）
Total base number of lubricating oil

8.　低質燃料の経済性

8.1　燃料費

A重油の価格をC_A(円/ℓ)，C重油の価格をC_C，C重油のブレンド割合（容積比）をr_b，ブレンドのための費用をZ(円/ℓ)とすれば，ブレンド油の価格C_Bは(1)式で表わされる[2)]。

$$C_B=C_A\left\{1-r_b\left(1-\frac{C_C}{C_A}\right)\right\}+Z \qquad \cdots\cdots(1)$$

図14に，ここ2年半の福岡におけるバージ扱いのA重油とC重油価格[3)]の推移を示し，Zを1円/ℓとして算出した5/5のブレンド油価格，及びブレンド油とA重油の価格差を併記した。一時期は9円/ℓ近くまであった価格差は，現在では5円/ℓ程度まで縮まってきている。

A重油の一定割合を低質燃料におきかえたときの燃料節約度合Sは，油種が変わっても熱効率に変化がないと

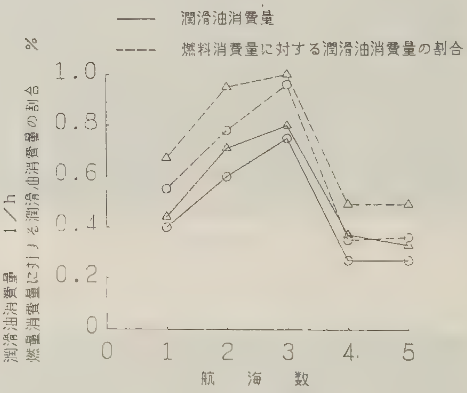


図 13　潤滑油消費
Lubricating oil consumption

表 5　不溶分増加率とアルカリ消費率
Late of insoluble increase and Alkalinity consumption

燃料油種	低質燃料		軽油	A重油
	A丸	B丸		
不溶分増加率　wt%	0.0143	0.0180	0.0033	0.0186
アルカリ消費率 mgKOH/g	0.0207	0.0340	0.0161	0.0293
硫黄の硫酸への変化率　%	0.0397	0.0694	0.0920	0.0930

仮定すれば，燃料消費量を$Q_A(\ell)$，低質燃料使用量をQ_B，A重油の比重をr_A，真発熱量をH_A(kcal/kg)，C重油のそれをr_C，H_Cとすれば(２)式[2)]で表わされる。

$$S=\frac{Q_B}{Q_A}\left\{1-\frac{1-r_b\left(1-\frac{C_C}{C_A}\right)+\frac{Z}{C_A}}{1-r_b\left(1-\frac{H_C r_C}{H_A r_A}\right)}\right\} \quad \cdots\cdots(2)$$

主機関と補機関の燃料消費量の比を８：２として，主機関のみに5/5のブレンド油を使用したときの燃料節約度合は，59年２月の価格で9.7%，Q_Aを１隻当り年間700kℓとすると燃料節約額は440万円となる。

8.2　ランニングコスト

ランニングコストの増加として，加熱用ヒータや燃料供給ポンプ，遠心清浄機の動力源としての電力使用量の増加に伴う補機関の燃料消費量の増加や，潤滑油のグレードアップによる価格差，場合によっては交換間隔の短縮による使用量の増大が考えられる。A丸，B丸の実績から，前者が年間57万円，後者は５万円程度と推定される。

8.3　メンテナンスコスト

メンテナンスコストも当然増加するが，これはすでに述べた様に機関の低質燃料対策とその使われ方により大幅に異なる。一つの目安として，A/Cのブレンド比が，72/28と22/78のブレンド油を使用した場合の年間のメンテナンスコストの増加額の検討結果[2)]より，定格出力当りのコスト増加額Mは(３)式よりブレンド比r_bで推定され，5/5のブレンド油では約36万円となる。

$$M=624r_b-60r_b^2 \cdots\cdots(3)$$

8.4　イニシャルコスト

イニシャルコストについては新造船と現存船の場合で異なり同じ現存船でも機関の冷却方式，燃料清浄機の有無，ヒータのための補機関容量の余裕度など，ベースになる現存船の仕様により大幅に異なる。低質燃料関係の配管やヒータ等の改造工事を500万円程度とすれば，新造船や清水冷却で燃料清浄機を所持している現存船では，燃料価格が変わらないと仮定すれば２年程度で償却が可能と推定される。一方，冷却方式の改造には１年（造水機を交換する場合はプラス1.5年），燃料清浄機の新設では0.5年，補機関の容量が不足するため換装が必要となる場合にはさらに2.5年程度の償却期間の延長が考えられる。これらの改造工事を全て実施すれば償却までに６～9.5年を要するため，船令によっては低質燃料の使用による経済効果を得ることができなくなる場合もある。

9.　あとがき

内航商船などで低質燃料に対する機関の使用実績が増え信頼性が向上している一方で，燃料を混合した場合の安定性に不安が持たれていることと，A重油とブレンド油の価格差を勘案すれば，低質燃料の使用できる環境の整備された漁業種にあっては，漁船の新造時にはブレンド油よりむしろ180cStのC重油の直接使用の方向へ持っていくべきと考える。その場合には，低質燃料の使用範囲の拡大と主機関の低負荷運転を緩和するために主機駆動発電を採用するとともに，燃料の移送のための加熱には機関の冷却清水を利用する等の省エネルギー設計とすることが望ましい。

本文をまとめるに当り御指導を賜った東京漁業技研草間喜代松代表取締役に深謝します。また，ご多忙中にもかかわらず調査にご理解とご協力をいただいた機関監督，機関長をはじめとする水産会社の方々，日本遠洋底曳網協会，データの提供をいただいた造船所，機関メーカ，その他お世話になった各位に感謝します。

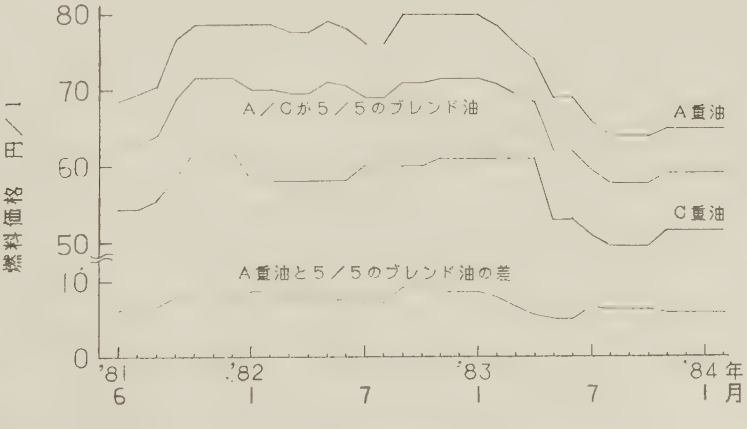


図 14　燃料価格変化
Fuel cost

参考文献

1） 野崎照雄・小林　力：舶用ディーゼル機関システム油の使用状況と今後の塩基価管理，日石レビュー，Vol. 22，No. 4，pp. 5～18，1980.

2） 中型漁船の省エネルギーに関する報告書：漁業省エネルギー対策委員会，全国漁業協同組合連合会，1984.

3） 積算資料：(財)経済調査会，1981. 7～1984. 3.

Burning of Blended Fuel on Fishing Boat Engine—II

— Tow Boat Trawlers Burning Lower Quality Marine Fuel Oil on Their Engines —

By

Ken'ichi ODA

Summary

This report descrives investigations of tow-boat trawlers in the East China Sea with medium-speed diesel engines burning blended fuel of Bunker C and marine diesel oil to save the fuel cost.

Performance and maintenance of the engines were investigated and economical efficiency was compared with fishing boat engines using marine diesel oil.

Running with blended fuel, the engines of standard marine diesel oil form except for fuel heater and Stellite-face exhaust valves resulted in an increase exhaust temperature and specific fuel consumption. Maintenance interval of valve, injector and turbocharger reduced about a half period in comparison with burning marine diesel oil.

However satisfactory results were obtained on a newly-built fishing boats with new engines which had a sufficient counterplan for low grade fuel.

水工研報告　6
1985　pp. 253～266

多目的計量魚群探知機

古澤昌彦*・宮野鼻洋一*

目　次

1.　はじめに……… 253
2.　原理……… 254
　2.1　推定方法の分類 ……… 254
　2.2　ソーナー方程式 ……… 254
3.　設計……… 254
　3.1　設計指針 ……… 254
　3.2　周波数の決定 ……… 255
　3.3　送受信系の設計 ……… 256
　3.4　設計例 ……… 257
4.　装置及び較正……… 258
　4.1　装置 ……… 258
　4.2　較正 ……… 258
5.　推定方法……… 260
　5.1　個体推定 ……… 260
　5.2　個群推定 ……… 260
6.　試験……… 260
　6.1　個体推定 ……… 261
　6.2　個群推定 ……… 262
7.　おわりに……… 263
　参考文献……… 265
　Summary ……… 266

1.　はじめに

近年，魚群探知機を定量化し，エコー処理を行って，水産資源の推定を行う，いわゆる音響資源調査法が脚光を浴びている。このような目的に沿った魚群探知機は，計量用魚群探知機（計量魚探機）と呼ばれ，エコー処理装置や航法計器と結合された場合には，計量魚探システムと呼ばれる。

現在，数種類の計量魚探機が実用されているが，推定値の精確さ，実用性，適用できる方法の点で，まだ多くの問題点がある。この原因は，まず，計量魚探機が通常の魚探機の延長と考えられ，計量魚探機の独自の設計法や性能が明確にされていないことにある。例えば，魚探機の設計指針は探知距離最大であるが，計量魚探機では推定誤差を最小にすることが第一の目標でなければならない。第二の原因は，エコーのディジタル処理に重点がおかれ，エコー自体の忠実性や記録が軽視される点である。例えば，魚種判定等のために計量魚探機でも重要な役を演ずる記録の方法は，通常の魚探機と同じである。第三の原因は，比較的簡単な積分方式が偏重されている点である。この方式は，広水域の平均エコーエネルギーから分布密度を推定するが，ほぼ同一体長同一魚種が中層の広い水域にほぼ均等に分布していないと誤差が大きくなる。しかし，我が国周辺では，このような条件が満たされることは少ない。したがって，積分方式以外の各種の推定が行える計量魚探機が必要である。

そこで，精確な推定が可能のこと，記録を重視すること，多目的であること，実用的であること，を目標として，新たな計量魚探機を開発した。

この開発に当っては，内外の多くの研究成果を取り入れた。第一に，主に欧米で開発された各種の推定方式が可能となるよう設計を行った[1]。第二に，最近の誤差面からの研究成果[2),3),4)]により，誤差を少くする工夫を行った。第三に，生簀用魚量計[5)]の開発過程で得た，群体に対する推定方法，装置の設計方法・較正方法の知見を取り入れた。第四に，筆者らの行っている魚のターゲットストレングス（TS と略す）及び魚群による音波減衰の研究[6),7)]から主に周波数の決定に対する知見を得た。第五として，青山，見元[8)]の提案になる段階記録方式をエコーレベルの絶対量表示方式に発展させた。第六に，魚探機の出現以来，横田，浅見，花岡ら[9)]の行ってきた，魚群記録の幅と高さの積和を魚量の相対指標とする方式を，密度と体積の積和を知る方式へ発展させ得る装置とした。最後に，本城，鈴木ら[10)]の行っている魚群の集群

---

*　漁船工学部

生態の研究から表示法等の知見を得た。

以下，まず，各種の推定方法を整理し，それらに必要な性能を明らかにする。次に，忠実なエコー信号を得るための設計方法を検討する。これらをもとに，試作機及び実用機を製作し，フィールド試験によりその実用性を確かめる。

2. 原　　理

2.1 推定方法の分類

まず，計量魚探機による各種の推定方式を整理する。

魚の分布は，魚種・成長段階・海洋環境・時季・時間等により複雑に変化し，それによりエコー信号の性質も異なる。図1は，エコーの性質から推定方法を，個体推定，個群推定，広水域推定とに分類したものである。

個体推定は，比較的疎な分布に対して分解能の高い音響系を用いた場合に得られる個々の魚からのエコー（単体エコー）を対象とする。エコーの個数を計数し分布密度を推定する計数方式，魚の TS の自然状態推定方式などがこれに属す。

個群推定では，比較的密集した個々の群れからのエコー（群体エコー）を対象とする。魚群体積と群内密度とを推定し，それらの積和から資源量を推定する。

広水域推定は，広水域の反射体全体のエコーエネルギーを平均し，平均体積散乱強度ないしは平均分布密度を求めるもので，処理方法から積分方式とも呼ばれる。

これら以外にも，反射の周波数特性，群内構造，游泳状況等の高次の情報が得られゝば，魚種判定等に有効である。

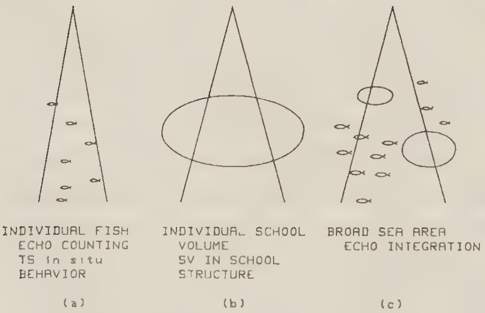


図1　計量魚探機による3種の推定方式

Three types of estimation by the quantitative echo-sounder.

2.2 ソーナー方程式

個体推定の基礎となるのは，次式で示される単体エコーに対するソーナー方程式である。

$$P_F{}^2 = P^2 D^4(\theta, \varphi)\frac{e^{-4\alpha r}}{r^4} t_s \qquad \cdots\cdots(1)$$

こゝに，P_F はエコー音圧，P は送波音圧，r, θ, φ は送受波器位置を原点とした場合の魚の位置の球座標，D は音圧指向性関数，α は吸収減衰係数，t_s は TS の値である。

個群推定の場合には，体積散乱理論が応用でき，下式のソーナー方程式が基本となる。

$$P_M{}^2 = P^2 \frac{c\tau}{2} \Psi \frac{e^{-4\alpha r}}{r^2} n t_s \qquad \cdots\cdots(2)$$

ここに，P_M は群体エコーの音圧，c は音速，τ は等価パルス幅[11]，Ψ は等価指向角（立体角）[11),12]，n は分布の尾数密度である。

$$s_v = n t_s \qquad \cdots\cdots(3)$$

は体積散乱強度（SV と略す）であり，これを一次的な推定対象とすることが多い。Ψ は，魚の分布範囲と指向性関数 D との関数となるが、魚が広く分布している場合には D のみによって決まる値 Ψe となるので，そのような条件下で測定を行う。具体的には，寄与率

$$\eta = \Psi / \Psi_e \qquad \cdots\cdots(4)$$

が，例えば90％以上となるビーム幅 $2\theta_{90\%}$ より大きい分布で測定を行う[13)]。

広域推定でも，(2)式のソーナー方程式を用いる。ただし，この場合には(2)式を船の走航方向及び深度方向に平均することが必要であり，直接得られるのは，平均体積散乱強度 $\overline{\mathrm{SV}}$ である。この方法は，疎分布又は小魚群に対しても適用可能であり，(4)式の η は1とおけるが，平均操作により(2)式を成立させるので，平均（積分）範囲内で偏った分布では，推定誤差が大きくなる。

3. 設　　計

3.1 設計指針

計量魚探機は，多様な分布に応じて適切な方法が選べ，上記のソーナー方程式によって目的とする情報が正確かつ簡単に得られる性能をもたなければならない。

そこで，下記のような設計指針を立てゝ開発を行った。

1) 各種の推定方法が適用できること（多目的）。
2) 送受信系を定量化し，推定誤差を極力小さくすること（高精確度）。

3)　記録を重視し，エコーの絶対レベルを簡単に読みとれること（エコーの絶対レベル表示）。

4)　2周波を有機的に結合し，反射の周波数特性が直視でき，又，分解能の選択が容易に行えること（2周波の有機的結合）。

5)　記録及び磁気収録データの解析，保存，再解析がし易いこと（解析容易）。

6)　簡便に使える装置とする為，極力小型・軽量とし，最小構成を少なく，かつ，システム化を容易とすること(軽便)。

3.2　周波数の決定

通常の魚探機の周波数は，探知距離が最大となるように決定される14)。計量魚探機でもこの条件が重用であるが，推定誤差を最小にすることの方が重要である。計量魚探機の周波数の決定については未だ研究がほとんどない。したがって，以下，減衰，反射，分解能などについて検討し，周波数を決定する。

吸収減衰は，探知距離の面で高周波の限界を決める最大の要因であるとゝもに，誤差の面でも限界を与える。(1)，(2)式から，吸収減衰係数に $\Delta\alpha$ の誤差があった場合の推定誤差は，デシベル単位で $2\Delta\alpha r$ である。海洋条件により α の値が変り，又，α の表式も未だ充分正確にはなっていない。その為，$r=200$m とすると，想定される最大誤差は，25kHz で 0.8dB，100kHz で 4dB，200kHz で 10dB と，周波数と共に急激に増す13)。α の値を可変とするのも一法ではあるが，α の複雑な変化に正確に追従することは困難である。この面から，周波数は極力低い方が良い。

吸収減衰以外で周波数特性をもつ減衰には，走航減衰，気泡減衰，魚群減衰がある。走航減衰は，送受波器の船底突出量を増し，装備位置に気をつけ，泡除けのツバをつけることにより無視できる程度にすることができる14),15)。気泡減衰は，風波により海面付近にまき込まれた気泡による減衰であり，未だ充分に研究されていないが，大体の値は次式で与えられる3)。

$$A=(0.9754-0.08597w+0.002367w^2)\times f^{1.32}\exp(-1616.77w^{-2.36}z) \quad \cdots\cdots(5)$$

$$(8\leq f\leq 60,\ 6\leq w\leq 30,\ z\geq 1)$$

こゝに，A は総合減衰量（dB），w は風速（kn），f は周波数（kHz），z は送受波器深度（m）である。このように，周波数の 4/3 乗に比例し，風速の増加及び送受波器深度の減少と共に急激に減衰が増す。一例を示すと，$z=1$m，$w=20$kn で，25kHz では 3dB，100kHz では 8dB と相当に大きい。この補正はむずかしいので，送受波器深度を深めると共に極力低周波を用いる必要がある。魚群減衰とは，密集魚群による音波の減衰であり，これによりいわゆるシャドウイング効果が起こり負の誤差が出る。この研究も少ないが，実測データ7)に基づく試算によると，通常の場合の誤差は 1dB 以内と考えられ，僅かながら正の周波数特性をもつ。しかし，分布密度の高い産卵期の魚群等を対象とする場合には，相当に大きくなるはずである。

魚体の TS の周波数特性は，魚体の大きさと魚探周波数での波長とが同程度なので，かなり複雑である。したがって未だ定説はないが，体長が波長の数倍以上の魚ではわずかに正の周波数特性を示し，数分の一以下ではレーリー散乱領域となるため相当に大きな正の周波数特性を示すとされている1),17)。しかし，プランクトン17)及び小魚18)で負の特性をもつことも報告されている。又，大きい魚の場合6)反射の指向性が鋭く，魚の姿勢変化により TS が大きく変化し，このため誤差を生ずる可能性がある。以上により，多種の魚を対象とし，魚種判定の材料を与えるためには，大きく離れた周波を備えることが好ましいこと，誤差のみに限るならば低周波が好ましいと言える。

個体推定や個群体積推定では，分解能を高める必要がある。方位分解能を高めるためにはビームを鋭くすれば良いが，この場合ビームの揺れによる誤差が生ずる。これは，揺れにより送波時と受波時の指向特性が異なることによる誤差である。一例によると，密度推定の誤差は，揺れの周期4秒，振幅5°，魚群深度 400m の時，ビーム幅5°で−64%，10°で−10% である4)。したがって，送受波器を安定化しない限り，方位分解能が制限される。距離分解能を上げるためには，パルス幅を短かくすればよい。しかし，パルスの立上り時間がそれ以下でないと誤差を生ずる。この点からは高周波が好ましいが，最近の技術によれば，低周波でも低Qの送受波器を作ることができるから，距離分解能は周波数に対して大きな制限は与えない。以上により，分解能に関しては高周波がやゝ好ましいが，大きな周波数決定要因とはならない。

表1は，以上の議論を整理したものである。大きな誤差をもたらす吸収減衰及び気泡減衰を考えると，分解能による制限の許す限り低周波にすることが好ましい。多目的の計量魚探機としては，高低の分解能が選べ，TS についての要求からは，大きく異る2周波を備えることが好ましい。そこで，低周波には魚探周波数としては，下限に近い公称 25kHz を選び，この分解能を高める目的で振動面積を大きくし，低Qとする。高周波としては，公称 100kHz とし，ビーム幅は 10°程度とする。

3.3 送受信系の設計

図2のような送受信系を前提とする。Mを受波感度，G_Rを前置増幅器の利得，E_Rをその出力とする。

以下，説明を簡略にするため，変数等に次のような表記法を用いる。Eは電圧，Gは利得，Kは係数を表わす。添字Fは単体エコー，Mは群体エコー，Lは低周波，Hは高周波を表わす。実際の値は1字に適当な添字をつけてあらわし，その dB 値は2字を大文字とする。

（1），（2）式の距離項は，TVG 処理によって消去し，後の処理を簡単にする。この利得は G_T を係数として，それぞれ，

$$G_F(r)=G_{TF}r^2e^{2\alpha r} \quad \cdots\cdots(6)$$

$$G_M(r)=G_{TM}re^{2\alpha r} \quad \cdots\cdots(7)$$

とすればよい。これらの特性をそれぞれ，40 log r 及び 20 log r の TVG と呼称する。TVG 出力電圧 E_T は，それぞれ下式となる。

$$E_{TF}{}^2=K_F{}^2D^4t_s \quad \cdots\cdots(8)$$

$$K_F=PMG_RG_{TF} \quad \cdots\cdots(9)$$

$$E_{TM}{}^2=K_M{}^2nt_s \quad \cdots\cdots(10)$$

$$K_M{}^2=(PMG_R\,G_{TM})^2\frac{c\tau}{2}\Psi_e \quad \cdots\cdots(11)$$

以下，次の順序で設計を行う。

1) SN 比から送波レベルを決定する。
2) エコー処理に必要なレベルから総合的な送受波感度を求める。
3) 反射の周波数特性が記録によって読み取れるように周波数間の感度比を定める。
4) 単体エコーと群体エコーのレベルをそろえるよう工夫を行う。
5) 受信系のリニアリティを損うことのないようにゲイン配分を行う。

表1 周波数の決定

Determination of frequency

項　　　目	記　号	重要度	推　奨 周波数
減　　衰			
吸収減衰	α	◎	低
気泡減衰	α_b	○	低
走航減衰	α_s	△	?
魚群減衰	α_f	△	低
ターゲットストレングス	t_s	○	低，高
分解能			
距離分解能	$c\tau/2$	△	高
方位分解能	θ_{-3dB}	△	高，低

送波レベルは，レベルの小さい単体エコーについて決定すれば充分である。（1）式より単体エコーレベルは，送波レベルを$SL=20\log P$とすると，

$$PF=SL+40\log D-40\log r-2\alpha r+TS \quad \cdots\cdots(12)$$

となる。一方，雑音レベル NL は，NP を雑音スペクトルレベル，Δf を受信系の帯域幅，DI を指向性利得とすれば，下式となる。

$$NL=NP+10\log\Delta f-DI \quad \cdots\cdots(13)$$

NP には走航騒音が最も大きく寄与し，大体

$$NP=145-18\log f \quad \cdots\cdots(14)$$

$$(0\mathrm{dB}=1\mu\mathrm{Pa}/\sqrt{\mathrm{Hz}})$$

となる[14]。Δf は，単体エコーを測定する計量魚探機としては，パルスの立上り時間 t_r を優先して決める必要があり，

$$\Delta f=0.7/t_r \quad \cdots\cdots(15)$$

以上としなければならない。指向性利得 DI は，Aを送受波面面積，λを波長とすると下式となる。

$$DI=10\log\frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad \cdots\cdots(16)$$

（12）式と（13）式との差を SN とすると，

$$SL=SN-40\log D+40\log r+2\alpha r-TS+NL \quad \cdots\cdots(17)$$

によって送波レベルが決まる。

次に，総合的な送受波感度を決める。単体エコーと群体エコーとのレベル関係は後に考察するから，単体エコーについて考える。（8）式の E_{TF} が，処理に必要な最大レベル$E_{T\max}$になるように，K_F を決めればよい。

$$KF=20\log E_{T\max}-40\log D-TS \quad \cdots\cdots(18)$$

反射の周波数特性が直読できるようにするには，2周波間のゲイン比を適当にする必要がある。単体エコーについては，指向性主軸にいる魚のエコーレベルの差が

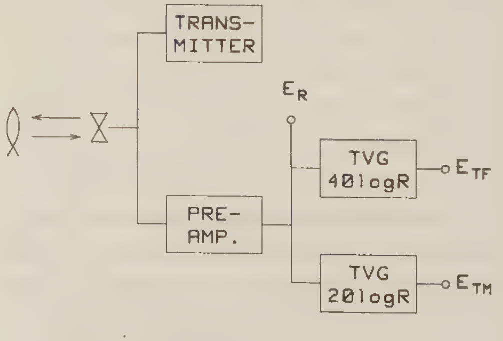


図2 送受信系のブロックダイヤグラム

Block diagram of transmitter and receiver.

TS の差になるようにする。(8)式から次式が導びかれる。

$$KF_L = KF_H \qquad \cdots\cdots(19)$$

一方，群体エコーについては，SV のレベル差が直読できることが好ましい。(10)式から K_M を両周波で等しくすればよいから，

$$GT_{MH} - GT_{ML} = 10\log(\Psi_e\tau)_L - 10\log(\Psi_e\tau)_H \qquad \cdots\cdots(20)$$

が成立する。

多目的の計量魚探機は，20 log r と40 log r の 2 種の TVG を各周波独立に持つ必要がある。従って 4 種の信号が得られる。これらの信号は全て磁気収録されるが，記録（表示）は 2 種までである。そして，受信器の感度設定は記録を主体として行われる。したがって，磁気収録等のための信号レベルを適当にし，歪や SN 比の悪化を防ぐには，4 種の信号レベルを大体そろえる必要がある。又，このようにしておくと，TVG モードの切換えの際の感度調整も不要となる。周波数間については上で考えたので，単体エコーと群体エコーのレベルを大体そろえればよい。(8)，(10)式で $E_{TM} \simeq E_{TF}$，$D=1$ として下式を得る。

$$G_{TF} - G_{TM} \simeq 10\log\left(n\Psi_e\frac{c\tau}{2}\right) \qquad \cdots\cdots(21)$$

最後に，ダイナミックレンヂについて考察する。前置増幅器はエコー信号の伝搬減衰分を含む大きな変化に応ずる必要があるので，その出力 E_R の上限は大きくしたい。又，TVG 回路出力には，伝搬減衰分はなくなるが，後段の検波段の小電圧に対するリニアリティが悪いので，この出力の最大値も大きくしたい。よって，TVG の下限距離 $r_{\min}$ での TVG 回路のゲイン $G(r_{\min})$ は大きくできない。そこで，E_R と E_T の最大値が同一の場合には，$G(r_{\min})$ は 3 程度以下とする。さらに，TVG 回路が飽和する前に前置増幅器が飽和してはならない。このためには，$G(r_{\min})$は 1 以上でなければならない。これらの条件を(6)，(7)式に入れると，

$$0 < GT_F + 40\log r_{\min} < 10 \qquad \cdots\cdots(22)$$

$$0 < GT_M + 20\log r_{\min} < 10 \qquad \cdots\cdots(23)$$

となる。

.4 設計例

表 2 に設計例を示した。

送信パワしたがって送波レベル SL は，キャビテーションの発生限界によって制限される。そこで，(17)式における TS の最小値及びそれに対する指向性関数 D の最小値さらに最大距離 $r_{\max}$ が制限される。表の例の場合では，TS が −50dB（体長換算約 7 cm）の魚が，片道の指向性関数が −5dB となる方向において100mの深度にいる場合，SL として 25kHz では 227dB，100kHz では217dB 必要であり，この程度が現実的な値となる。しかし，(14)式の雑音スペクトルレベル，特に走航時のレベルを下げることができれば，この限界は改善される。さらに能力を増すためには，相関技術等の導入が必要となる。

表中例えば②などの番号は，実際の値を決める順序をあらわしており，それぞれ直上の関係式を満たすように値を決めればよい。

表 2 設 計 例

Example of designed values.

変数	単位	条件又は設計値			備考
f	kHz	25		100	
λ	cm	6		1.5	
α	dB/km	4.14		35.6	文献(13)
NP	dB	65.8		55.0	(14)式
τ	ms		2		一例
t_r	ms		0.2		
Δf	kHz	2.6*	3.5	3.5	(15)式
A	cm²	$\pi\times9^2$		$\pi\times5^2$	実際例
DI	dB	19.5		26.4	(16)式
Ψ_e	sr	0.086		0.015	文献(13)
$40\log D$	dB		−10*		
$r_{\min}$	m		3		TVG 下限
$r_{\max}$	m		100〜200*		単体のみ
$TS_{\min}$	dB		−50*		
n	1/m³		0.1〜1		
$SN_{\min}$	dB		6		
$E_{T\max}$	V		8		
NL	dB	80.5		64.0	(13)式
SL	dB	227〜240		217〜236	(17)式
KF	dB	78	=	78	(18)(19)式
GT_M	dB			$GT_{ML}+8$	(20)式
		③ −8		④ 0	
		GT_F+9〜19		GT_F+17〜27	(21)式
		② −9〜1		② −1〜9	
			−9.5〜0.5		(23)式
GT_F	dB		−19〜−9		(19)(22)式
		① −18	=	① −18	

注 ＊印は実際上の制限のため妥協。

②等は決定順序を示す。音圧単位 μPa。

4.　装置及び較正

4.1　装置

図3に装置の構成を示した。

一般の計量魚探機は，エコー積分器などのエコー処理装置を必要とするが，本計量魚探機では記録機によりエコーの絶対レベルが読めるので，これ自体一種のエコー処理装置であり，しかもこれだけで個体推定及び個群推定の多くが可能となる。エコー積分器，カラー表示器，コンピュータ等との結合を行うこともできるので，積分方式などの自動処理や精密な測定も行える。

電磁ログは，航程量を与え，エコートレース長，サンプリング体積，魚群の大きさなどを知るのに用いられる。磁気録音は後日の解析に利用でき，PCM 録音機を採用したので，ダイナミックレンヂが広く録音時間も長い。これには，2周波2TVG 合計4種の信号と必要なパラメーター全てを収録できる。

送受波器には，PZT のアレイを用い，ほぼ軸対称ビームとし，サイドローブを抑圧した。又，低周波についてはQを下げ，分解能を高めた。共振周波数は，28.5 kHz 及び 92.6kHz である。図4には方位角 φ に対して平均した指向特性 D 及び(4)式の寄与率を示した。

送受信器では，送受信，各種の制御，パラメーター設定，磁気収録などのための信号変換などが行われる。通常の魚探機では，記録機から送信トリガーが送られるが，本機の場合送受信器が独立して送信を制御できる。このため，送信回数を増したり，任意のシステム構成が可能となるなどの融通性が増した。又，「記録連動」のモードにすれば，通常の魚探機と同様に，レンヂに応じ紙送り速度も自動的に変る。

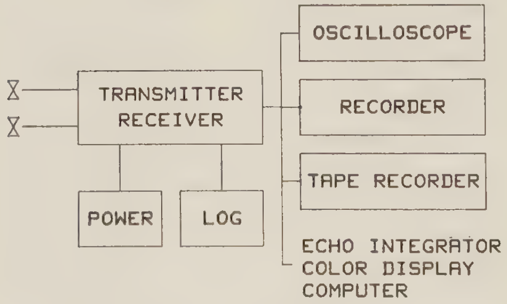

OSCILLOSCOPE
TRANSMITTER RECEIVER
RECORDER
TAPE RECORDER
POWER
LOG
ECHO INTEGRATOR
COLOR DISPLAY
COMPUTER

図3　計量魚探システムの構成

Setup of the quantitative echo-sounder system.

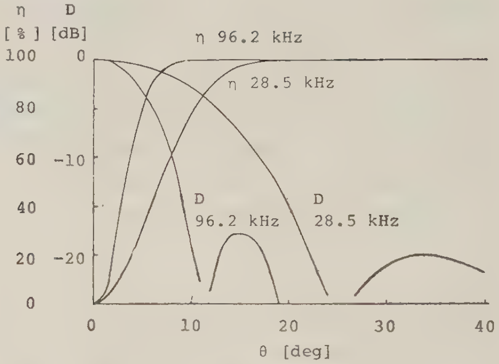
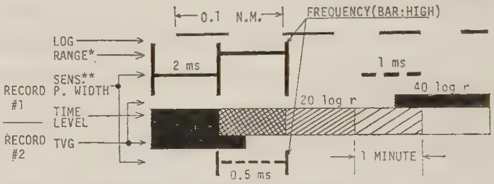


図4　指向性関数 D と寄与率 η

Directivity pattern D and contribution factor η of the transdcers.


0.1 N.M.
FREQUENCY(BAR:HIGH)
LOG
RANGE*
SENS**
RECORD #1
P. WIDTH
TIME
LEVEL
RECORD #2
TVG
2 ms
1 ms
40 log r
20 log r
0.5 ms
1 MINUTE

COLOR NAME	B	BG	G	GW	W
*RANGE	25	50	100	200	400
**SENSITIVITY(SR,dB)	0	10	20	30	40

6 dB STEP	VOLTAGE(V)	8.49	6	4.24	3	2.12	1.5	1.06	0.75	0.53
	LEVEL ($\frac{EL}{dB}$)	3	0	-3	-6	-9	-12	-15	-18	-21
3 dB STEP	VOLTAGE(V)	7.14	6	5.05	4.24	3.57	3	2.52	2.12	1.78
	LEVEL ($\frac{EL}{dB}$)	1.5	0	-1.5	-3	-4.5	-6	-7.5	-9	-10.5

図5　レベルパターンと種々のマーカ

Level pattern and marks displayed at the top of the record paper.

記録機には段階記録方式[8)]を採用し，図5のように記録濃度とエコーレベルとを対応させた。同図に示すように，記録の上部に定量的推定に必要なパラメータ類全てとレベルパターンを表示させ，エコーの絶対レベルの読取りを可能にした。記録濃度は黒，黒灰，灰，灰白，白の5段階とし，ステップとしては6 dB及び3 dBが選べる。6 dB ステップを用いた場合は，ダイナミックレンヂは30dB と大きくなる。3 dB ステップでは，これが15 dB となるが，再生時にこれを用いると1.5dB程度の精度の読み取りが可能となる。黒以上のレベルは，白とし，オーバレンヂ警告及びホワイトラインの効果を持たせた。記録紙は，解析のし易さを考え，300mm 幅の乾式とした。大容量のメモリ（4 kW）を用いたので，画質を落とさずに水平，垂直方向に大幅な拡大ができる。

4.2　較正

計量魚探機では較正又は調整が重要である。この較正

は，音響的較正が主となる前置増幅器以前の較正，電気的較正が主となる TVG 以後の較正，最終的な総合較正とに別けて行った。

これらの較正のうち特に重要なのは，(9)，(11)式にあらわれる送受信係数 PMG_R の較正である。この較正は，予め TS が測定されている較正球によるのが誤差も少なく容易である[11),19)]。すなわち，前置増幅器出力 E_R を測定して，

$$E_R{}^2=(PMG_R)^2\frac{e^{-4\alpha r}}{r^4}t_s \qquad \cdots\cdots(24)$$

から，PMG_R が総合的に較正できる。又，実際のエコー波形は正確な矩形でないため，特定の点で測定を行う。その点で 1，継続時間 τ_M とした波形 $w(t)$ を観測し，

$$\tau=\int_0^{\tau_M} w^2(t)dt \qquad \cdots\cdots(25)$$

を得て，パルス幅の較正を行った。

図 6 は，較正時のスチール球 (34.9mmφ，100kHz での TS は−41.0dB)の記録である。左はパルス幅0.5ms，右は 2 ms の場合である。同一球をテグスで 2 個つり，TVG 特性のチェック及びふかれ防止の効果をもたせた。エコーが強弱を繰り返すのは，船の揺れによるビーム外

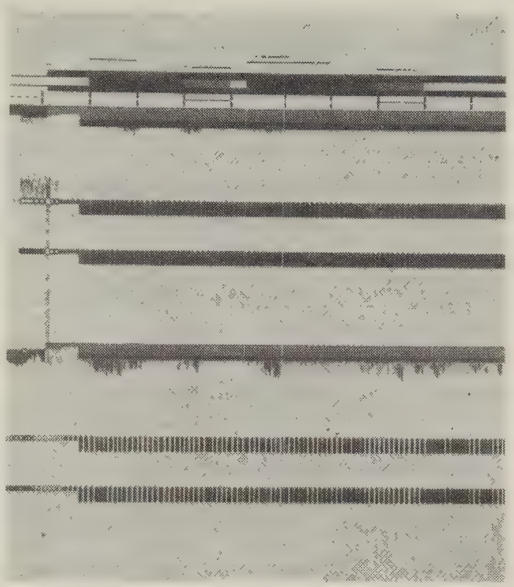


図 6　較正時の 2 個のスチール球 (34.9mmφ) の記録

Echogram of two steel spheres (34.9mmφ) in calibration procedure. Frequencies are 28kHz (upper) and 96kHz (lower), and pulse width is 0.5ms (left) and 2ms (right).

表 3　各種推定方法

Estimation methods by the quantitative echo-sounder.

大分類	方法	略号	TVG L H	パルス幅 (ms)	得られる情報	手段	備考
個体推定	簡単なＴＳ測定	ＴＳＳ	40　40	0.5，1	ＴＳ→Ｌ	Ｓ，Ｒ	
		ＴＳＤ	40＝40	0.5，1	ＴＳ→Ｌ	Ｒ，Ｓ	
		ＴＳＬ	40　40	0.5～2	ＴＳ→Ｌ	Ｒ	ＣＴＲと共に
	ＴＳの周波数特性	ＴＳＦ	40＝40	0.5，1	ＴＳ―ｆ	Ｒ，Ｓ	
	エコー計数	ＣＴＲ	40　40	0.5～2	ｎ	Ｒ	ＴＳＬと共に
		ＣＴＡ	40　40	0.5	ｎ	Ａ，Ｒ	
	ＴＳの大きさ毎の計数	ＣＦＲ	40　40	0.5，1	ＴＳ―ｎ	Ｒ	
		ＣＦＡ	40　40	0.5，1	ＴＳ―ｎ	Ａ，Ｒ	
個群推定	体積推定	ＶＬＣ	20or40	0.5，(1)	Ｖ	Ｒ	ＳＶＲと共に
	群内密度推定	ＳＶＲ	20 (20)	2	ＳＶ→ｎ	Ｒ	ＶＬＣと共に
	ＳＶの周波数特性	ＳＶＦ	20＝20	2	ＴＳ―ｆ	Ｒ	
広水域推定	積分方式	ＳＶＩ	20　20	0.5～2	$\overline{SV}\to\overline{n}$	Ａ	

凡　例

L：低周波
H：高周波
＝：両周波要す
20：20log r
40：40log r

→：変換
―：特性
L：体長
f：周波数
n：密度
V：体積

R：記録
S：オシロスコープ
A：エコー処理要す

れのためであり，このような記録を見つゝピークをつかまえ，オシロスコープにより反射レベル及び波形を観察し，上記の方法により較正を行った。

5. 推定方法

本計量魚探機で用いることができる推定方法について述べる。表3には，これらの方法をまとめてある。広水域推定には別にエコー積分器を要するので，こゝでは，個体推定及び個群推定の代表的な方法のみ述べる。

5.1　個体推定

自然状態TS測定は（8）式に基づいて行う。ほぼ同体長の魚が分布している場合には，指向性主軸を通った魚のエコーが最も強いので，エコーレベルの大きいものを読めば，$D\simeq 1$とおけ，TSがわかる（これをTSS法と呼ぶ。以下，測定方法は3っつの大文字であらわす）。その際，高周波の方が指向性が鋭いので，高周波でレベルの高い部分で低周波のレベルを読めば確度が上る（TSD法）。又，(19)式により，KFを両周波で等しくしてあるから，両周波のエコーレベルを比較することによってTSの周波数特性が直読できる（TSF法）。

これらの方法が，記録濃度のレベルEL（図5参照）から簡単に行えるように工夫をした。（8）式で，$D=1$とおき，K_Fに含まれる受信器の感度SRを考慮し，その他の係数の端数をなくすように調整すると，10dB単位の係数をKAとして，

$$TS \text{ or } SV=KA-SR+EL \qquad \cdots\cdots(26)$$

とすることができる。したがって，TSが記録から暗算によって求まる。後に述べるように，SVも同一の式で求まる。

TSの値から大体の魚体長を推定することができる。Loveは，多くの研究者のTSの測定値を収集し，背方向の平均TSの式として，

$$t_s=0.0033L^2 \qquad \cdots\cdots(27)$$

を与えている16)。こゝに，Lは魚体長(m)である。Lとしてcm単位を用いこれをdB表示すると，

$$20\log L=65+TS \qquad \cdots\cdots(28)$$

となる。上記のようにして求めたTS値をこの式に代入することにより，大体の体長も暗算により推定できる。

エコートレース（への字型の単体エコーの記録）の平均長$\bar{l}$からも平均TSを求めることができる（TSL法）。つまり，$\theta_t=2\bar{l}/\pi r$によりエコーの出始める角度（スレッショルドビーム角13)）が推定でき，これと(8)式とから次式でTSが推定できる。

$$\overline{TS}=20\log\frac{E_t}{K_F\{D(\theta_t)\}^2} \qquad \cdots\cdots(29)$$

E_tはスレッショルド電圧で，図5から0.53V（6dBステップの場合）又は1.78V（3dBステップの場合）となる。

単体エコーの数を計数することにより分布密度の推定が可能である1)。これには，記録によりエコートレースの数を数える方法（CTR法）と，各送信に対するエコーパルス数（エコートレースを構成する個々のパルス）を計数する方法（CTA法）とがある。CTR法の場合は，深度方向及び走航方向に記録を区画分けし，その範囲のエコートレース数を計数し，サンプリング体積1),18)で割って密度とする。CTA法は，自動処理に向いている。

その他の個体推定法として，CraigとForbesの方法1)（CFR，CFA法），遊泳状況の推定も行える。

5.2　個群推定

個群体積は，普通，魚群の形を円柱と仮定し推定される（VLC法）。この場合の推定体積Vは，魚群の幅W，高さHとすると

$$V=4W^2H/\pi \qquad \cdots\cdots(30)$$

となる。この方法では，分解能の高い高周波を用いた方が誤差が少ない。

群内の密度又はSVは(10)式を用いて推定できる（SVR法）。この式も(26)式のように変形できるので，TSと同様に暗算できる。図4又は（4）式の寄与率ηが90%となるビーム角を90%ビーム角θ90%と呼び，このビームが魚群内に完全に入る範囲で等価指向角をΨ_eとして測定すれば，誤差は－10%以内となる11),13)。分解能が高い高周波による分布断面でこの測定範囲を判断し，その範囲内で，密度推定誤差の少い低周波によりSVの推定を行えば，誤差が少い。具体的には，高周波の魚群記録の両端から$r\theta_{90L}$（Lは低周波の意）除いた残りの範囲で，低周波の魚群記録から(26)式によりSVを読む。SVをTSの推定値で割り，これに推定体積Vを掛けて個群量とする。

その他の個群推定としては，(20)式により(10)式の係数K_Mが2周波で同一となっているから，記録上の濃度差から直ちにSVしたがってTSの周波数特性を知ることができる（SVF法）。又，パルス幅を短かくすれば，群内構造の推定が行える。

6. 試　　験

1984年5月に土佐湾で行った試験の結果から，いくつ

かを示す。なお，以下の記録は全て図５の 6 dB ステップを用いたものである。

6.1 個体推定

図７は単体エコー及びプランクトンの記録例である。図５から諸パラメーターは次のように読み取れる。

記録モード：第一記録低周波，第二記録高周波

TVG：両周波とも$40 \log r$

船速：５kn（６分間のマイルマーク数）

レンヂ：50m（BG）

感度 SR：両周波とも 30dB（GW）

パルス幅：両周波とも２ms

感度を同じにしたので，反射の周波数特性が直読できる（TSF 法）。低周波で明確にあらわれている単体エコーは高周波ではほとんどあらわれず，プランクトン層は逆に高周波の方が濃くなっている。TSS 法によって単体エコーの TS を推定する。KAが -20dB に調整してあり，エコーレベル EL は比較的濃いエコーの平均的な濃度として -3dB（B と BG の中間）と読めるから，

$$TS=-20-30-3=-53\text{dB}$$

と計算できる。これを(28)式により体長に変換すると，

$$20 \log L=65-53=12\text{dB}=4\text{cm}$$

となる。使用波長が5.3cmであるから，もしこの周波数において(28)式が正しいとするならば，波長と同程度の体長の魚の TS は負の周波数特性を示すことも有ることになる。

上記の TSS 法と TSL 法とを比較してみる。(29)式の各値は以下となった。

$r=25$m（対象範囲20～30m）

$\bar{l}=10.4$m

$\theta_t=0.26\ \text{rad}=14.9°$

$D(\theta_t)=-7.3$dB（図４）

$E_t=0.53V=-5.5$dB（図５）

$K_F=74.8-10=64.8$dB（74.8は最大感度40dBに対する較正値，感度は30dBを用いたから40−30＝10dB 補正する）

$TS=-5.5-64.8+14.6=-56$dB

TSS 法に較らべて 3dB 小さかったが，これは電磁ログの誤差によると考えられる。

次に CTR 法によって分布密度を推定してみる。

走航距離 $d=465$m

対象深度範囲 $r_1 \sim r_2=20 \sim 30$m

エコートレース数＝133個

サンプリング体積$d\theta_t(r_2^2-r_1^2)=60450\text{m}^3$

密度 $133/60450=2.2\times10^{-3}$尾/m^3

このように計数方式の対象となる分布はかなり疎であ

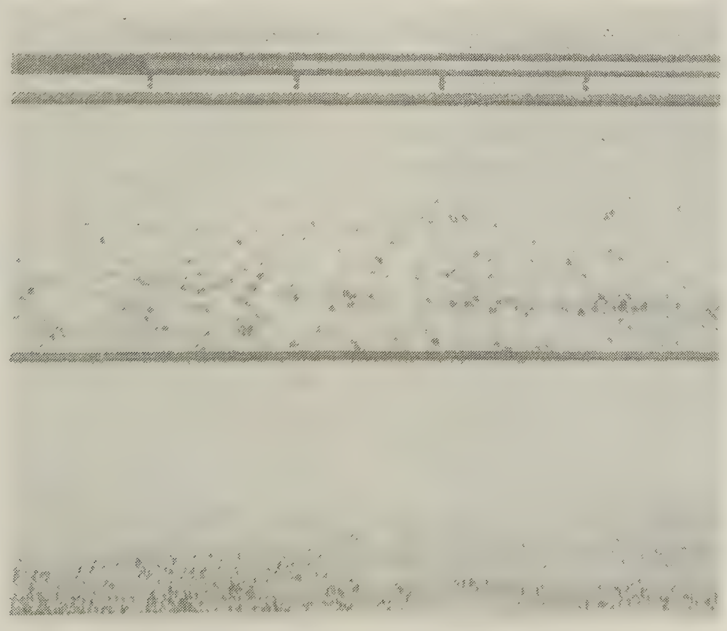


図７ 単体魚とプランクトンの記録

Echogram of mixed distribution of individual fish and plankton.

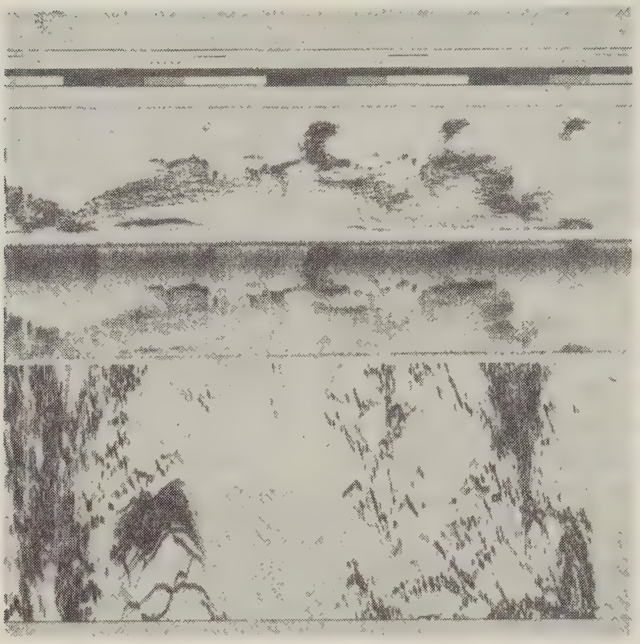


図 8　停船中の魚群記録。下は海底固定拡大（20m）

Record obtained when the ship drifted. The 2 nd record is bottom-locked.

る。

図8は，魚群上に停船して得た記録である。第一記録を海底固定拡大（20m幅）して第二記録としている。TVGは40 log r を用い，0.5msのパルス幅を用いて個体推定を行い易くした。釣獲を行ったところ，多数のウルメイワシが釣れ，50尾平均の尾叉体長は18.9cm（標準偏差0.93cm），平均体重は74.2g（標準偏差11.5g）であった。この記録を見ると，複雑な軌跡を描く反射の大きい魚と，きれいな三日月型の反射の弱い魚が混在していることがわかる。海底固定の効果によって，船の動揺による記録のあばれが消え忠実な記録となっている。前と同様にしてTSS法でTSを求め体長に変換すると，前者は−40dB，18cm，後者は−55dB，3cmとなり，前者は釣獲結果と大体合った。小さい魚はたぶんウルメイワシの餌となるシラスの類と考えられる。

図9は，図8の記録の左の一部分を上下とも2倍に拡大し，低高両周波を左右に並べたものである。40 log r のTVGを用い両周波の感度をそろえてあるので，単体エコーの周波数特性がわかる（TSF法）。低周波で右上に出ている魚群は高周波では出ていない。その下の亀状の魚群は，密度が高くエコー合成が行われ低周波でオーバーレンヂ（白抜き）になっている部分のみ高周波で現われており，その下の層状の群れも高周波では部分的にしか現われていない。しかし，ほぼ同一層のプランクトン層は，高周波のみに見られる。最下層の線状の魚は両周波でほぼ同レベルである（エコーの長さの違いはビーム幅の違いによる)。拡大部分において，高周波で反射の強い部分で低周波のエコーレベルを読めば，TSS法がより正確になる（TSD法)。図8についての検討結果と総合すると，少くとも3種の魚種が混在しており，それらはたぶん，プランクトン，3cm程度の小魚，18cm程度のウルメイワシであり，それらの間の食物連鎖がうかがえる。

図10には，部分拡大の例を示す。送受波器を低Qとしてあるため，単体エコーの立上がりが良いことや，エコーのレベル変化が良くわかる。このようなエコーの分析により遊泳姿勢の情報を得るなどの新たな可能性が与えられる。

6.2　個群推定

図11には個群記録の例を示す。この例では，VLC，SVR，SVFの各方法が使える。表4に各魚群についてのデータをまとめた。魚群の幅Wは，低周波の場合に過大となるので，高周波の値を用いる。前述のように，幅Wが$2r\theta_{90L}$より小さい魚群のSV測定はできないが，体積の値から見てこれを無視する誤差はごく僅かであろ

う。魚種及び体長は不明であるが，ウルメイワシ又はマイワシの群れと考えられるので，前記のウルメイワシのサンプルデータにより，(27)式により TS を仮定した。個群のコエーレベルは，両周波でほぼ等しいが，小魚群では高周波がやゝ高い。これは，寄与率が低周波で低くなるためであろう。プランクトン層の出方に大きな周波数特性が見られる。すなわち，高周波では周辺部分が線状に濃く，低周波では中間部が濃い。したがって，種類又は大きさの異る少くとも2種類のプランクトンがいたと考えられる。又，個群の下限が，高周波であらわれている層の上縁に正確に一致しているのが特徴的である。

図12は，他の個群記録の例である。低周波は1ms，高周波は0.5msのパルス幅を用いた。分解能の高い高周波では群内構造がわかる。特に真中の魚群では，一つの群れが3っつのグループに別かれていることがわかる。プランクトン層については前図と同じ特徴がうかがわれる。

表 4 個群推定の結果

Result of estimation on individual schools.

魚　群	単位	A	B	C	D	E	F
幅 W (低)	m	9.2	11.6	48.6	5.6	31.0	36.0
(高)	m	8.2	9.2	46.2	2.8	30.0	34.0
高さ H	m	2.4	5.6	14.0	2.7	8.1	4.3
体積 V	m^3	205	603	38047	27	9282	6329
レベル EL	dB			3		3	3
SV	dB			−47		−47	−47
密　度	尾/m^3			0.18		0.18	0.18
尾　数	尾			6848		1671	1139
重　量	kg			508		124	85
$2r\theta_{90L}\simeq 14$m		SR	30dB		KA	−20dB	
体　長	18.9cm	体重	74.2g		TS	−39.5dB	

7. おわりに

以上述べたように，ほぼ初期の結果が得られた。特に記録上でエコーレベルの読み取りが可能であるため，魚量のみならず，体長や魚種推定の材料が比較的簡単に得られる。

今後は，この装置を用いた実際的な資源調査方法を確立して行く。又，エコーインテグレータやカラー表示器と結合し，さらに強力な計量魚探システムとする予定である。

本研究を行うに当り，鹿児島大学の間庭愛信教授，東海区水産研究所の鈴木秀弥氏，同所蒼鷹丸の山中完一船

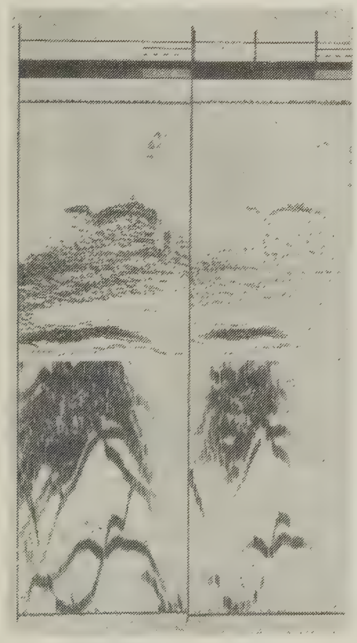


図 9 図8の一部の拡大。左28kHz，右96kHz

Frequency characteristics of scattering. The echoes are the same with those of the left part of Fig. 8., but range is halved and records for two frequencies are shown (left: 28kHz, right: 96kHz).

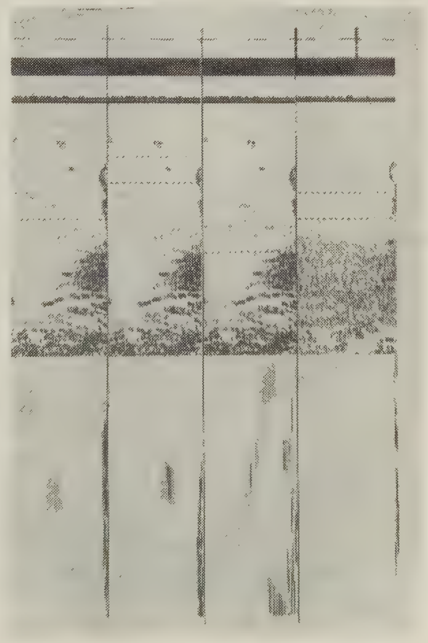


図 10 単体エコーの拡大

Expanded single echoes.

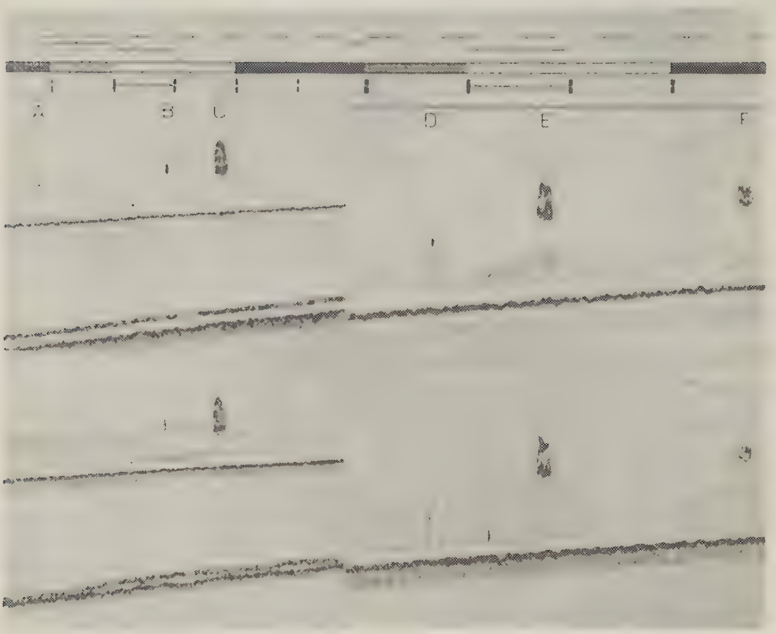


図 11　個群の記録例

An example of echoes of individual schools. Result of abundance estimation is shown in Table 4. Absolute volume back-scattering level and frequency characteristics is observed directly from record.

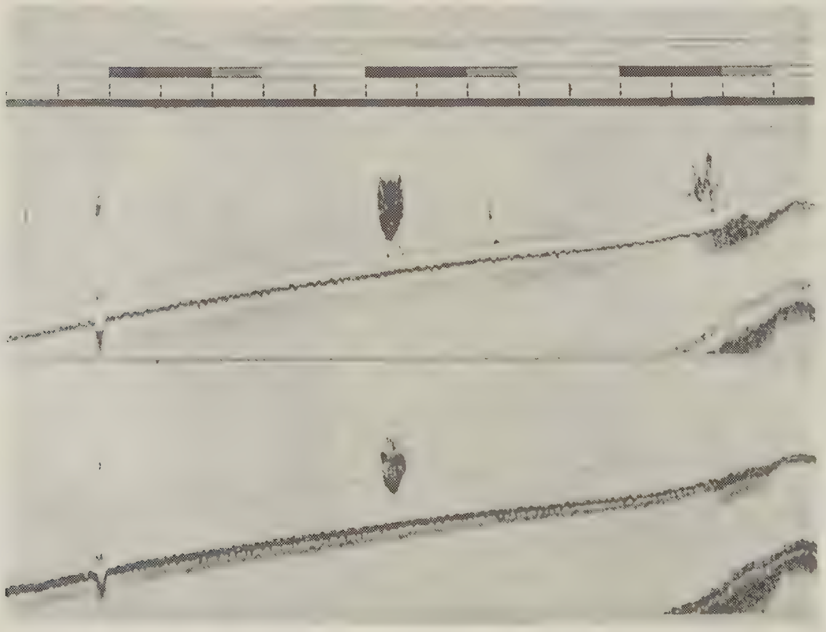


図 12　個群の群内構造

Structure of individual school. High resolution especially for high frequency (lower record, pulse width 0.5ms) reveals the structure.

長，南西海区水産研究所の花岡藤男氏，古藤力氏には，御教示御協力を頂いた。本研究は「漁業資源評価システム高度化調査」の一環として行ったものであり，水産庁資源課丹羽和美氏及び橋本啓芳氏に御支援頂いた。本計量魚探機の設計・製作・試験にわたり海上電機(株)の大久保輝氏，根本喜久郎氏他の方々にお世話になった。海上試験においては，水工研たか丸船長戸部稀介船長以下船員の方々，東海水研蒼鷹丸の船員の方々，南西海区水研日高覚船長以下船員の方々にお世話になった。芝浦工大学生井村昇氏（現三井造船）及び東海大学学生倉都健治氏は本研究に参画された。その他多くの方々の御支援を頂いた。こゝに記して感謝致します。

参考文献

1) Forbes, S.T. and O. Nakken(Ed.): Manual of methods for fisheries resource survey and appraisal. Part 2. The use of acoustic instruments for fish detection and abundance estimation, FAO Manuals in Fish. Sci No. 5, 1972.

2) Foote, K. G.: Absorption term in time-varied-gain functions, Fisk Dir. Skr. Hav Unders., 17, pp. 191-213, 1981.

3) Novarini, J. C.: Effects of the sub-surface bubble layer on sound propagation, J. Acoust. Soc. Am. 72(2), pp. 510-514, 1982.

4) Stanton, T.K.: Effects of transducer motion on echo-integration techniques, J. Acoust. Soc. Am. 72(3), pp. 947-949, 1982.

5) 古澤昌彦・石井憲・間庭愛信・鶴ケ谷武雄・今井健一：生簀用超音波魚数計，音響学会54年春季講論集，pp. 15-16, 1979.

6) 宮野鼻洋一・石井憲・古澤昌彦：魚体の背方向ターゲットストレングスの測定例，水工研技報(漁船) 4, pp. 95-105, 1983.

7) 石井憲・古澤昌彦・宮野鼻洋一：魚群減衰係数の測定，水工研技報（漁船）4, pp. 73-94, 1983.

8) 青山恒雄・見元孝一：漁業資源調査方法の開発に関する研究（魚群計量装置による方式），農林水産技術会議研究成果68, pp. 145-185, 1973.

9) 花岡藤男：資源調査における魚探機の応用，昭和55年度漁業資源研究会議第13回浮魚部会議事録，pp. 29-33. 1981.

10) 本城康至・鈴木秀弥：「群れ」の研究の視点，ミチューリン生物学研究16（1, 2), pp. 54-59, 1980.

11) 古澤昌彦・石井憲：超音波魚量計による魚群密度の測定理論，水工研報告 1，pp. 143-156, 1980.

12) ブルチンスキー，J.（見本訳，青山監修）：魚類資源評価のためのソナーシステム使用法，日本水産資源保護協会，1982.

13) 古澤昌彦：魚群探知機の VTG についての検討，水工研技報（漁船）6, 1985.

14) 西村実：魚群探知機の最適周波数に関する研究，学位論文，1969.

15) 古澤昌彦，宮野鼻洋一：計量用魚群探知機の船間較正及び走航減衰調査，水工研技報（漁船）4，pp. 61-71, 1983.

16) Love, Q. H.: Target strength of an individual fish at any aspect, J. Acoust. Soc. Am. 62(6), pp. 1397-1403, 1977.

17) Penrose, J.D. and G.T. Kaye: Acoustic target strengths of marine organisms, J. Acoust. Soc. Am. 65(2), pp. 374-380, 1979.

18) 古澤昌彦，宮野鼻洋一，石井憲：昭和57年度クイックアセスメント実測調査報告書（計量魚探システム及びターゲットストレングス），水産庁研究部，pp. 280-314, 1984.

19) Foote, K. G.: Optimizing copper spheres for precesion calibration of hydroacoustic equipment. J. Acoust. Soc. Am. 71(3), pp. 742-747, 1982.

Multipurpose Quantitative Echo-sounder

By

Mashiko FURUSAWA and Yoichi MIYANOHANA

Summary

A new quantitative echo-sounder has been developed. The sounder is designed to be of multipurpose, accurate, and practical. It is used for various fish stock estimations, such as echo-counting, target strength (TS) measurement *in situ*, volume estimation of individual schools, estimation of density in schools, and mean back-scattering strength (SV) estimation. To get high accuracy we select a rather low frequency of 25 or 28 kHz, while by using simultaneously another high frequency of 100 kHz we are able to realize high resolution and to know the frequency dependence of TS or SV. A stepwise recording method adopted enables us to read the absolute echo level from the record and we can directly and easily estimate TS or SV in school. The field test confirmed the practicality and effectiveness of the sounder. An estimate of fish length by measured TS was 18 cm and the mean length by sampled fish was 18.9cm. The frequency dependence of scattering which was sometimes observed gave information for identification of target.

水工研報告　6
1985　pp. 267〜288

ベーリング海におけるイシイルカのサケ・マス流網への羅網の防止に関する音響的研究（第1報）

畠山良己*・石井憲*・武富一**

目　次

1.　緒言……………………………………………… 267
2.　問題の背景と対策の経過………………………… 267
3.　研究結果と考察…………………………………… 269
　3.1　エコーロケーションクリックスの分析 …… 269
　3.2　混獲防止用音波発生器の試作 ……………… 273
　3.3　音波発生器の到達距離 ……………………… 277
　3.4　流網の反射損失とイルカの検知可能最大距離 …………………………………………… 280
4.　結言……………………………………………… 286
　参考文献…………………………………………… 287
　Summary ………………………………………… 288

1.　緒　言

北洋サケ・マス流網漁業はその漁具漁法の性格上・海産哺乳動物（主としてイシイルカ）が混獲されることは避けられない現状であり，米国200海里水域を主な漁場としている母船式サケ・マス漁業は，米国海産哺乳動物保護法により厳しい規制を受けている。最近では混獲イシイルカの数を減少させる漁具・漁法を研究開発し，実地試験を行ってその効果を調べることが法律で義務付けられた。

イシイルカは北方沖合性のイルカであり，聴覚，エコロケーションのクリックスと検知能力，網や超音波パルスに対する行動など基礎的知見が殆んどなく，サケ・マス流網への羅網の仕方・原因についても推測の段階を超えず，混獲防止の技術・装置を開発するためにはそれらの基礎的研究を早急に行う必要がある。

音響的側面から見た混獲防止策として，流網の近くまで遊泳して来たイルカに対し音波を放射し注意力を喚起し警戒心を強めさせる能動的方法（現在のところ 9kHz と 145kHz），イルカがエコーロケーションを行う時流網からの反射波を大きくし，より遠くから流網を検知できるようにする受動的方法（中空糸網）の2つの方法が考えられる。

当研究所も1981年からこの調査研究に参画し，主として音響部門を担当しながら現在まで種々の実験を行って来たが，そのうちからイシイルカとリクゼンイルカのエコーロケーションクリックスの録音と分析，混獲防止用音波発生器の試作，音波発生器の到達距離の検討，流網の反射損失の測定とイルカの流網検知可能最大距離の検討について今回報告する。

2.　問題の背景と対策の経過[1)]

従来，北太平洋において，日本のサケ・マス漁船が流網を操業する時に，海産哺乳動物特にイシイルカが偶然的に流網することが知られていた。これらイルカの混獲は，漁獲目的であるサケ・マスの操業にとって著しく邪魔であり，それ自体利用価値がないので歓迎されないことであった。

1978年に北太平洋漁業国際条約が改訂され，締約国は条約区域における溯河性魚種の漁獲に際し混獲される海産哺乳動物に関する科学的調査活動の計画を作成し，日米共同調査を実施し，日本サケ・マス漁業が海産哺乳動物に及ぼす影響を解明し，混獲を減少又は皆無にする努力をすることが明示された。具体的には日米了解覚書によって調査研究の項目，収集資料及び検討すべき事項が定められ，これに基いて実施されている。

1981年6月9日までは，混獲される海産哺乳動物の実態解明の調査期間として，米国200海里水域内における混獲許可の取得が免除された。

母船式サケ・マス漁業の付属独航船の組合である日本鮭鱒漁業協同組合連合会（日鮭連）は，1981年6月10日から1984年6月9日までを有効期間として，米国200海里水域内で一年間におけるイシイルカ5,500頭，オットセイ450頭，トド25頭の混獲許可を米国商務省から得て，

---

* 漁船工学部　** 漁業生産工学部

表1　母船式サケ・マス流網漁業による
イシイルカ混獲

Number of Dall's porpoises entangled to the gill net in Japanese mothership salmon fishery

年	操業回数（A）	イシイルカ混獲数（C）	CPUE（C/A）
1978	8,284	497	0.06
1979	8,611	682	0.08
1980	9,551	1,000	0.10
1981	8,811	1,361	0.15
1982	8,957	3,190	0.36
1983	8,967	2,986	0.33

サケ・マス漁業を行ってきた。

表1に母船式サケ・マス漁業における混獲イシイルカの最近の統計を示したが，4船団独航船172隻で1操業約330反の網を使い，ここ2年間では約9,000回の操業で約3,000頭の混獲で5,500頭の制限内に入っているが，混獲防止技術を早急に開発し混獲数を更に減少させねばならない。

1982年12月には，1954年の北太平洋漁業法の第14節を修正したいわゆるイシイルカ修正法が成立し，日鮭連に対する包括許可は，1987年6月9日まで延長された。その法律の中ではイシイルカの死亡率を実行可能な範囲で最大限度まで減少させるような新しい漁具または漁撈技術を北太平洋のサケ・マス漁業において以下の年度計画により実施することが義務付けられた。

① 1984年漁期の開始までに全漁船の 25%
② 1985年 〃 〃 50%
③ 1986年 〃 〃 75%
④ 1987年 〃 〃 100%

更に毎年の調査の検討結果に基き，米商務省に対し翌年のアクション・プランの提出と日米専門家によるワークショップの開催が義務付けられた。

1987年以降の政策は，それまでの過去3カ年間（1984～1986）の活動と成果を評価し，米政府による公聴会を開いて決定されるであろう。上記の年度計画は中空糸網により実施されることが見切り発車となったが，1987年以降のためにも音響機器による混獲防止技術の開発は急務である。

これらの協約に対処するため，当研究所は1981年度において「サケ・マス流網漁業における海産哺乳類の混獲防止技術開発に関する緊急調査」2)を実施した。1982年からは水産庁委託事業として，日本大学農獣医学部が研究を担当することになったが，音響的研究については当研究所が協力している。

最初三陸沖に来遊するイシイルカ又はリクゼンイルカを生かして捕獲して，仕切り網の中で飼育しながら各種の実験をして基礎的知見を得ることを計画していたが，海況や遊泳行動から判断して捕獲が仲々難しいと分ったので，それと併行してベーリング海と日本近海で自然遊泳状態のイルカや停船中に船の周囲に寄ってくるイルカについて，クリックス録音や音波に対する反応行動観察などの実験を行うことにした。

夏期の北海道知床半島のオホーツク海側にイシイルカが来遊するが，気温も高く凪状態で船に良く付き，港から1時間内外の海域に多数の群を発見できるなど実験条件が三陸沖合に比べ良いので，1983年からそこのイルカについて実験を行って来た。

今までの実験を年代順に列記してみると，1981年には三陸沖の捕獲実験，1982年にはベーリング海のイシイルカのクリックスの録音，三陸沖のリクゼンイルカのクリックスの録音と捕獲実験，混獲防止用音波発生器（145kHz）の試作，1983年にはベーリング海での高周波（75～145kHz）超音波パルスの放射実験とカーバイドガンの効果テストと対網行動観察，北海道斜里町宇登呂近海での捕獲実験と対網行動観察，流網の反射損失の測定，1984年には生かして捕獲したイシイルカについてクリックスの録音と超音波パルス・ロープ・糸に対する反応行動観察，ベーリング海での超音波パルス（20～50kHz）の放射実験とカーバイドガンの効果テスト，北太平洋でのクリックス録音，北海道斜里町宇登呂近海での低周波（20～50kHz）超音波パルの放射実験などである。

一方，母船式サケ・マス業界では，各会社から選出された漁撈専門家によるプロジェクト・チームを作り，1980年度には9kHz音波発生器と3本中空糸網の試作を行い，1981年度から現場試験を行って効果を調べている。

音響による混獲防止策としては，イシイルカの聴覚特性，超音波パルスに対する反応行動，クリックスの音響的特性などを調べ，①イシイルカに最も良く聴こえる超音波，②エコーロケーションを邪魔しびっくりさせるような超音波，③反射物の存在に気付き注意しながら接近する時に発生するクリックス，④シャチなどの天敵が発生する音波，⑤イシイルカが嫌う超音波パルスなどを流網に取付けた音波発生器から放射し，流網の近くまで遊れして来たイルカの注意力を喚気させ警戒心を強めさせる方法（現在のところ9kHz，145kHz）とイシイルカの対網行動とクリックスの音響的特性などを調べ，イルカがエコーロケーションを行う時流網からの反射波を大きくし，より遠くから流網の存在を知らせる方法（中空糸）の2つがある。

当初，イシイルカの行動生態，エコーロケーション能力などの基礎的知見が少いのに混獲防止機器の試作・実用化テストを行わねばならない状態であったが，ここ1～2年の間にそれらの知見も増えたので新しいシステムの開発を行い易くなってきた。

毎年の調査及び研究の成果は，2月下旬～3月上旬にかけて東京で開催される北太平洋漁業国際委員会（INPFC）の海産哺乳動物特別委員会科学分科会で日米加の科学者間で報告検討されている。

3.　研究結果と考察

3.1　エコーロケーション・クリックスの分析

Ridgway（1966）[3]が何頭かのイシイルカを飼育し，最高18カ月の飼育に成功して13.5kHzの水中信号でトレーナのところへ戻る訓練をしているが，その時には会話音（whistle）がなく10kHz位までの低周波クリックスを頻繁に発生していると報告している。Leatherwood & Ljungblad（1979）[4]は，7～10頭のイシイルカがソノブイに接近する時に発生したクリックスを録音して，ピーク成分が1.7～6.9kHzの周波数範囲のパルスであったと報告している。また，Awbrey（1979）[5]はクリックスの録音に一回だけ成功し，120～160kHzの高周波パルスの波形特性について詳しく述べているが音圧については不明である。実際のところイシイルカのエコーロケーション・クリックスは，低周波なのか高周波なのか，音圧はどの位なのかについて日本独自の録音測定を行い，エコーロケーション能力評価の基礎資料とする必要がある。

3.1.1　調査方法

昭和57年度のサケマス調査船（第12宝洋丸，284トン）に乗船する機会が与えられたので，ベーリング海のイシイルカのクリックスを録音することを計画した。

イシイルカのクリックス録音調査には，停船中の船の周囲を回遊するイシイルカのクリックス録音，流網に羅網した生存イルカのクリックス録音，走航中に船首波につくイルカのクリックス録音の3方法が考えられる。不要雑音を出来るだけ少なくするという点からは停船中の録音が最良であり，次に羅網した生存イルカ，航走中の船首波につくイルカの順である。また，自然の遊泳状態におけるクリックスという点では，停船中に接近するイルカと航走中に船首波につくイルカが望ましい。

停船中にイルカが接近してくるという現象も広大な海域を自由に遊泳するイルカ次第であり，今回の目的とした超音波パルスはイルカの嘴方向に放射されるので，それが水中マイクロホンに受波されるかは確率的に多いとは考えられない。羅網した生存イルカは，網に拘束され嘴方向が大きく変動しなく，水中マイクロホンとの距離を一定に保ちながら確実に音波を受波できる利点がある。しかし，交通事故的にたまに羅網し，かつ羅網してから揚網までの間生存していなければならなく，過去のデータでも一調査航海中で多い時で2～3回，少ない時で0回という不確実なものである。

ベーリング海への往復航海中及び調査点間の移動時に船首波に付くイルカのクリックスは，曳航体に水中マイクロホンを取付ければ録音できる可能性がある。但し，凪の状態で曳航体が余り上下動しなく，イルカが曳航体を危険物と感じないで船首についたり離れたり遊泳し，曳航体の水中マイクロホンの方向にクリックスを出すという条件がある。

以上述べたように，不確定要素が多くチャンスの少い録音であるが，エンジンを停止しなくても録音できるように，2～200kHzの周波数範囲の音波を録音することとし，上記の3方法に対処できるように準備した。高い周波数に限定した理由は，過去の文献でも余り低い周波数の音波を出していなく，昭和56年度に三陸沖で突棒で突いて未だ生きていたリクゼンイルカの鳴音を録音しようとしたが20kHz以下の音波を発生していなく，また昭和54年のベーリング海における長崎大学の竹村氏の録音調査でも25kHz以下の鳴音が聴かれなかったことによる。

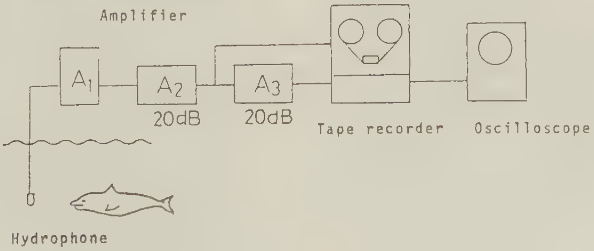


図1　測定・分析ブロックダイアグラム

Block diagram of measuring and analyzing devices

表 2　イシイルカのクリックの分析結果

Results of analyses of Dall's porpoise's clicks

測定個所		音圧 P_1 (dB)	周波数 f (kHz)	音圧 P_2 (dB)	時間 t_1 (ms)	音圧 P_3 (dB)	時間 t_2 (ms)	音圧 P_4 (dB)	時間 t_3 (ms)	パルス幅 τ (μs)	最大音圧 P_{max} (dB)	最大パルス間隔 T_{max} (ms)	最小パルス間隔 T_{min} (ms)	パルス数 N	T_{max}/T_{min}
1	A	43	149	41	1.2	41	0.53	33	0.55	53	60	67	62	18	1.1
	B	59	〃	57	1.3	54	0.44	49	0.66	58					
	C	39	145	57	1.3	56	0.38	45	0.72	56					
2	D	41	142	30	0.69					62	61	28	7.8	47	3.6
	E	61	149							51					
	F	57	138							47					
	G	58	135							51					
	H	52	〃							49					
	I	36	139	28	0.72	34	0.72	30	0.28	47					
3	J	63	149	53	0.64	53	0.83			60	63	41	33	21	1.2
4	K	57	135	53	0.44	48	0.67			64	57	28	21	14	1.3
5	L	54	139	43	0.83	52	1.0			56	54	85	22	9	3.9
6	M	59	142							51	60	150	19	26	7.9
7	N	64	139							56	65	130	30	15	4.3

リクゼンイルカについては，捕獲実験で突棒で突いて生きているものを舷側に引き寄せてクリックスを録音することにした。

3.1.2　録音・分析装置

録音と分析のブロックダイアグラムを図1に示し，主な仕様を以下に述べる。

テープレコーダ：ティアックR410型，（周波数範囲）300Hz～200kHz，（テープ速度）60インチ/秒

水中マイクロホン：B&K 8103型，（周波数範囲）0～200kHz

増巾器：〔イシイルカ〕B&K2650 型他 2 台
〔リクゼンイルカ〕B&K 2635型
（周波数範囲）2～200kHz

オシロスコープ：ソニーテクトロニクス 564B

イシイルカでは増巾器3台により通常 CH1 には 60dB まで，CH2 には 40dB までのパルスを録音できるように増巾器，テープレコーダを調整した。リクゼンイルカでは増巾器1台とし，テープレコーダの入力調整により通常 CH1 に 37dB，CH2 に 57dB まで録音できるように設定した。

波形解析はテープレコーダの再生出力をメモリスコープに記録し，ポラロイド写真撮影により行った。

3.1.3　分析結果・考察

(1)　イシイルカ

第12宝洋丸の乗船中，クリックスの録音の機会が2回あった。6月26日5時，北緯56°30′，東経176°20′の調査点で揚網中に推定体長 170cm，体重の 80kg 生存イシイルカが羅網していたので，暫くの間左舷側に拘束し録音を行ったが，網が切れて逃げられた。その日は荒天で波が高くラインホーラの油圧装置を停止できなく雑音の多い測定であったが，約2分間録音した。

7月2日7時，北緯56°32′，東経178°32′の調査点で揚網終了し停船休憩している時，約10頭のイシイルカが船の周囲についた。秒速2～3mで1～4頭が交互に入れ変り立ち変り，あたかも左舷側に吊り下げた水中マイクロホンに興味があるが如く，何回も1～2mの距離に接近したので約10分間の録音が行えた。天候は晴で凪状態だったので，補機（310馬力）が回転しているだけで雑音の少い最高の録音条件であった。

図2のように分析パラメータを決めて各波形を解析し，その結果を表2に示した。7月2日の10分間の録音テープの中から明瞭な一連のパルスを発生している7カ所を選定し，A～C，D～Iは各一連のパルスの中の3個と6個について分析し，J～Nは一連のパルスの中の1個について分析している。

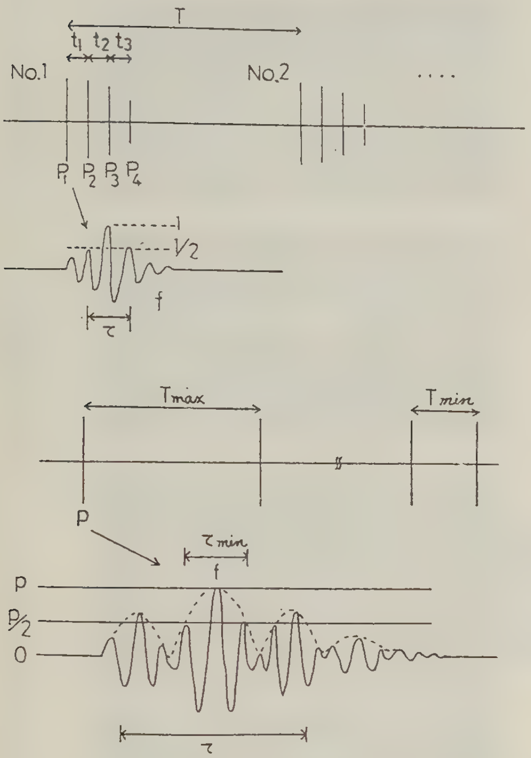


図2　クリックスの分析パラメータ
Analysis parameters of clicks

イシイルカのクリックスの代表的な例として，表2の測定個所1―Bを図3に示した。イシイルカのクリックスはオシロスコープの掃引を遅くして100～200ms/DIVで全体の状況を把握しようとすると図3の(a)の如く1個のパルスの繰り返しに見えるが，0.5ms/DIVの早い掃引で拡大してみると(b)のように0.4～1.3ms間隔で続く1～4個の複合パルスであり，更に20μs/DIVの掃引で拡大した(f)～(i)ではパルス巾50～60μsの基本単位パルスが5～6個連続しており，後になる程振巾が小さく，最初の基本単位パルスの振巾が最大である。

パルス巾はクリックスの包絡線で振巾が最大の½となる時間巾とし，周波数fは最大振巾を示す付近の3～5個の波形の平均周期から計算した。

今回のイシイルカのクリックスの分析では，135～149 kHzの狭帯域で一定周波数のきれいな正弦波であり，パルス巾は50～60μs，1～2mの距離での最大音圧は54～65dB(0dB=1μbar)，一連のパルス数は9～47個，その間隔は8～150ms，一連のパルスの中での間隔の最大値と最小値の比(T_{max}/T_{min})は1.1～7.9であり，そのクリックスも細かく見ると1～4個の連発パルスである。

今回の測定では，Ridgway (1966)3)と Leatherwood & Ljungblad(1979)4)が報告している低周波クリックス(10kHz以下)が見当らなかった。Awbreyら(1979)5)の報告では，イシイルカのクリックスの周波数が120～160 kHz，パルス巾が50μs～1ms，一連のパルス数が9～40，パルスの繰り返し(PRR)が7～80回/秒，1個のパルスが2個の複合パルスであったとしている。これに比べると今回の測定では周波数の広がりが少いこと，パルス巾の最小値は同じだが最大値は小さいこと，3～4個の連発パルスも含まれていること，PRRの最小値はほぼ同じであるが最大値が130回/秒と大きいことなどの点で異っているが，一連のパルス数は同じである。

他のイルカ例えばハンドウイルカ，カマイルカ，マイルカのクリックスの水槽内の測定6)ではピークエネルギーが30～60kHzにあり，パルス巾は50～250μsで，音圧は1mの距離で40～80dBであり，それに比べるとイシイルカの方が周波数が高く，パルス巾が狭く，音圧はその最大値より10dB位低いが中間値ではほゞ同じと考えられる。ハンドウイルカの野外実験7)ではクリックスの音圧が約120dB，ピークエネルギーの周波数が120～130 kHz，パルス巾が約40μsであり，環境によって音圧と周波数を使い分けている可能性がある。また，同系統のネズミイルカのクリックス8)の周波数が110～150kHz，パルス巾が100μs，音圧が1mの距離で40dBとなっており，イシイルカの周波数とパルス巾にほゞ同じであり，音圧だけが30dB位小さい。

イシイルカのクリックスの周波数が高く音圧が大きいことは網糸などの小さく細い物体の検知には有利であり，パルス巾が小さいことは物体と物体の間の分解能が良くなるが，周波数が高く超音波ビーム巾が狭いことは逆に空間全体を大まかに早く探査するには不利であり，咄嗟の判断で広がりのある障害物を避ける時には問題となるであろう。他のイルカに見られない複合パルスは，聴覚にエネルギー積分機能がある時に遠距離での探知能力を強めることになるが，分解能に関しては複合パルスの個々のパルスの反射波について細かく聴き分ける能力があれば物体間の距離の再確認となり分解能を良くするが，それが不可能とすると1個のパルスの方が判断し易い。但し，イシイルカが反射物と距離により複合パルスの数を使い分けているとすれば素晴しいエコーロケーション・システムと言える。

⑵　リクゼンイルカ

三陸沖の捕獲実験ではリクゼンイルカが捕獲され，それを使って各種の実験をやらなければならないことも考えられるので，そのクリックスを調べエコーロケーショ

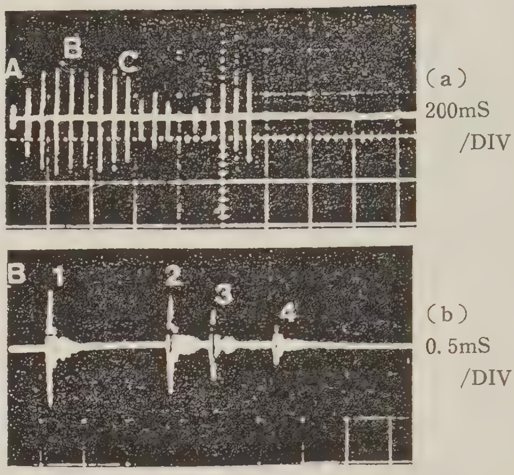
ン能力を見極めておく必要がある。

昭和58年1月27日，三陸沖で突棒銛で突いて1時間近く生きていたリクゼンイルカ（雄，190cm）を右舷側に引き寄せ，3～4mの距離で約8分間クリックスを録音した。

約8分間の録音テープの中で10回以上クリックスを発生しているが，明瞭なクリックスを発生している4個所について各々3パルスを抜き出して分析した。クリックスの拡大波形でピーク値の前後の振巾の減少が少ないので，図2のようにパルス巾(τ)の中の基本単位パルスを調べて最小パルス巾（$\tau_{\min}$）とした。

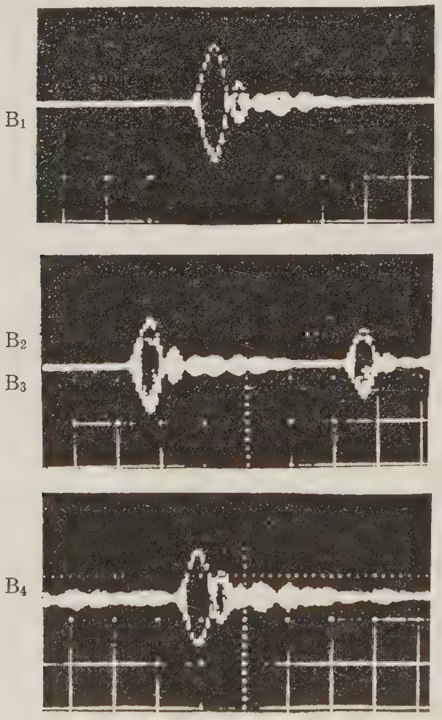
表3に分析結果を，また図4にリクゼンイルカのクリックスの代表例として測定個所2—D，E，Fの波形写真を示した。

リクゼンイルカのクリックスの周波数は122～136kHzできれいる正弦波で，パルス巾は36～206μs，音圧は37～58dB，一連のパルス数は20～148個，パルス間隔は2～14ms，$T_{\max}/T_{\min}$は1.6～4.6であり，複合パルスでなく1個のパルスである。拡大写真を見ると最小パルス巾は24～40μsで，それが4～5個連続しており，その振巾減少が少ないので総合的パルス巾はイシイルカより

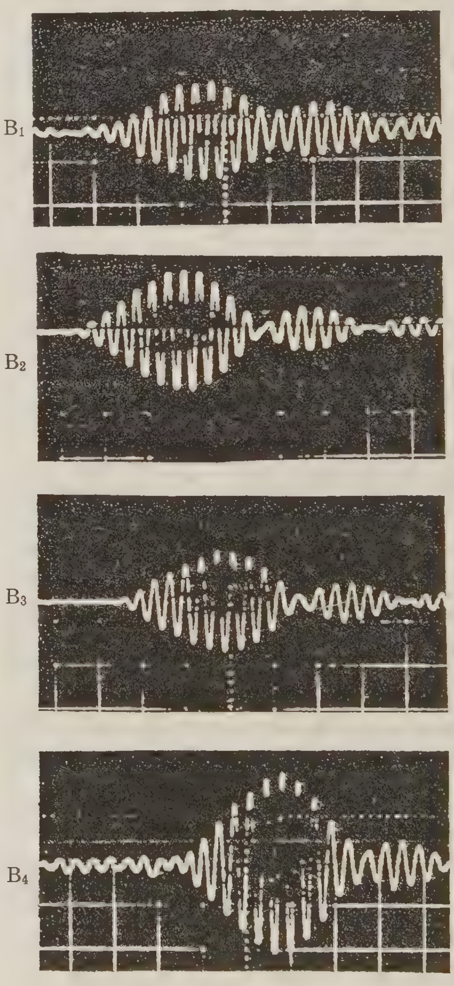


（a）200mS/DIV

（b）0.5mS/DIV



（c）0.1mS/DIV



（d）20μS/DIV

図3　イシイルカのクリックス

Photographs of Dall's porpoise's clicks

大きくなっているものが多い。しかも最初の基本単位パルスの立上りが微妙に変化しており，第2番目の基本単位パルスが最大値を示している。

リクゼンイルカのクリックスの周波数がイシイルカより10kHz位低く，イシイルカのパルス巾が50〜60μsであるのに対し，リクゼンイルカでは100〜200μsと広いのが多いが，$\tau_{\min}$ は逆に24〜44μsと小さいものが50%を占めている。両方のイルカとも1mの距離の最大音圧は65〜70dBでほぼ同じである。リクゼンイルカは舷側に拘束して水中マイクロホンの方向へ向けたので，一連のパルス数は大きくなっている。$T_{\max}$ と $T_{\min}$ は両方ともイシイルカの方が大きく，$T_{\max}/T_{\min}$ もイシイルカの方が広い範囲を示しているが船に接近遊泳時のエコーロケーションであるので当然と言える。

今回の録音は銛で突かれて瀕死の重傷状態のリクゼンイルカであり，クリックスが無意識のエコーロケーションなのか，救助を求める信号なのか，若しくは痛さによる悲鳴なのかは不明であり，通常状態のイルカのエコーロケーションクリックスを録音分析する必要がある。

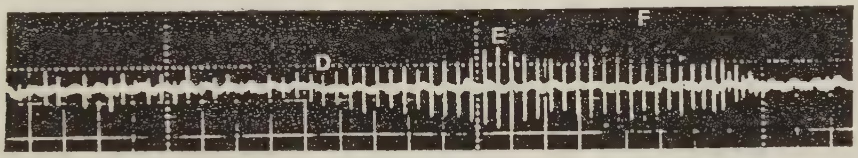
3.2 混獲防止用音波発生器の試作

いかなる状況と理由で流網に羅網するのか以下のような推測が行われているが，最近まで対網行動の観察やエコーロケーション能力の評価が行われていなかったのでどれが正しい説明なのか分らないのが実状であった。

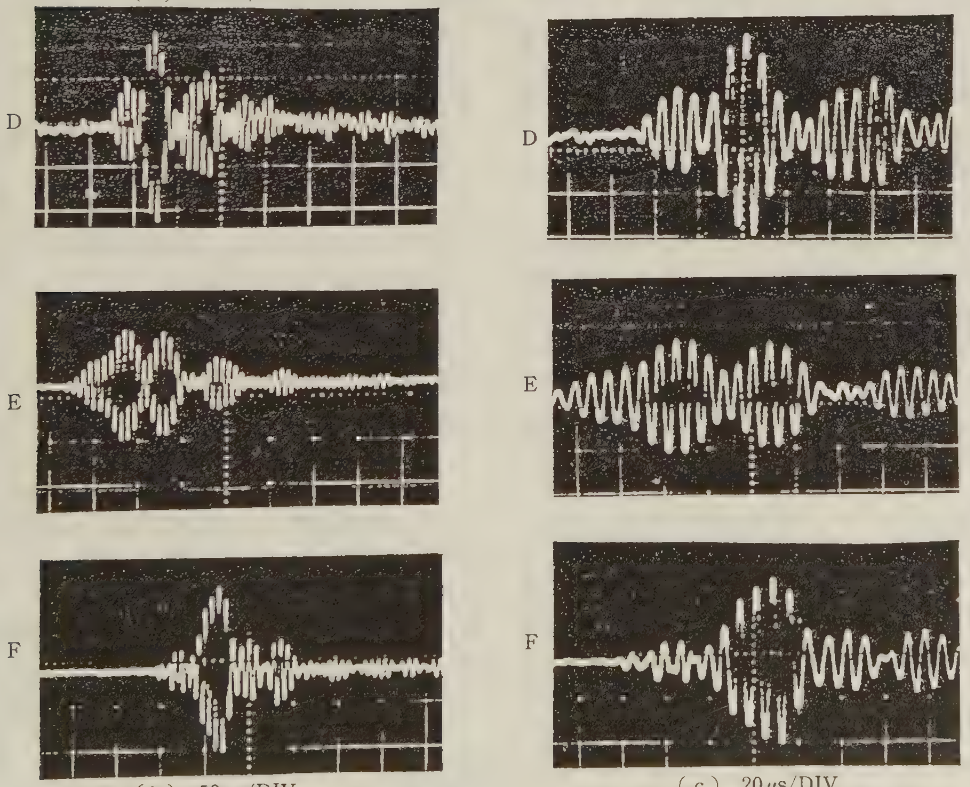
① 餌の追跡にのみエコーロケーションと注意力を注ぎ，突然網の近くに居ることに気付き慌てふためいて羅網する。

② エコーロケーションを積極的に使っていない。

③ エコーロケーション能力が低く，サケ・マス流網



（a） 20mS/DIV



（b） 50μs/DIV　　（c） 20μs/DIV

図4 リクゼンイルカのクリックス
Photographs of True's porpise's clicks

表 3　リクゼンイルカのクリックの分析結果

Results of analyses of True's porpoise's clicks

測定個所		音圧 P(dB)	周波数 f(kHz)	パルス幅 τ(μs)	最小パルス幅 $\tau_{\min}$(μs)	最大音圧 $P_{\max}$(dB)	最大パルス間隔 $T_{\max}$(ms)	最小パルス間隔 $T_{\min}$(ms)	一連のパルス数 N	$T_{\max}/T_{\min}$
1	A	45	134	117	24	45	7.8	1.7	148	4.6
	B	43	135	100	31					
	C	37	122	83						
2	D	44	135	100	29	56	16	5.6	52	2.9
	E	53	131	89	33					
	F	56	131	36	36					
3	G	45	132	178	78	48	7.8	4.9	20	1.6
	H	43	129	200						
	I	48	132	67	67					
4	J	58	136	189	53	58	14	8.9	32	1.6
	K	49	136	200	44					
	L	53	128	206	56					

の存在を検知できない。

④　荒天時や多くのイシイルカが同時にクリックスを発生した時など周囲雑音が大きくなり検知能力が低下し羅網する。

⑤　流網の端は三次元的に網成りが複雑となり，羅網し易い。

⑥　流網の近くで遊んでいる（playing）時，単純な不注意で交通事故的に羅網する。

推定豊度約 150 万頭1) のイシイルカに対し羅網数は約 3,000 頭で少いから根本的にエコーロケーションの検知能力が欠乏していて羅網するとは考えられなく，ベーリング海での対網行動を具ていても通常は網の存在を知り避けている。⑥が最も妥当で①と②については検討の余地があり，今までの羅網データから見て④の荒天時と⑤についてはその傾向が少し見られる。

イシイルカのクリックスを放射した時の反応行動観察実験を行っていないが，流網へ接近遊泳中のイシイルカに交通信号の黄色のシグナルを送り，注意力を喚起しエコーロケーションを積極的に行わせる意味において，表2の測定個所2のデータに基き送波モードを決め 135～150kHz の超音波パルスを発信するイルカ方式，イシイルカのクリックスの周波数だけを参考にした簡単な送波モードの単純方式の2とおりの装置を昭和57年度に試作し，昭和58年度から現場で効果テストすることにした。

3.2.1　イルカ方式

イルカ方式では，船に接近しUターンする時のクリックスの生物的意義（情報）によりイルカに接近注意の警報を与えるもので，反射物に接近する時は一般的にパルス間隔を小さくすることを利用している。

図5に示した送波モードの各パラメータを次のように決めた。

周波数 f：135→150kHz（Ｉの時間内にFM変調）

パルス巾 τ：100μs

パルス間隔 t_1：28→7ms（パルス間隔変調）

パルス発生時間 t_2：0.6s（この間に47個のパルス発生）

パルス発生間隔 t_3：2.4s

総合パルス発生時間Ｉ：76.8s（t_3×32）

総合パルス発生周期Ｔ：8min

電源：24V，電池交換2回/シーズン（58日）

使用可能日数（1回の電池交換）：1日14時間使用で21.5日間（水温4℃）

イシイルカのクリックスのパルス巾は 50～60μs であるが，送波器の駆動入力に対する立上り現象により充分な音圧を発生させるために2倍の 100μs としている。

3.2.2　単純方式

図5に示したように簡単な送波モードで回路を簡略化し，イシイルカのクリックスの周波数の 145kHz 超音波を，その 1,000 倍のパルス巾（50ms）で繰り返して発生し，その時間の長さ（エネルギー量）でイシイルカの聴覚を刺激すると共にエコロケーションを邪魔し，注意力を喚起させるものである。

周波数 f：145kHz（一定）

パルス巾 τ：50ms

パルス間隔 t_1：3s

総合パルス発生時間Ｉ：96s（t_1×32）

総合パルス発生周期Ｔ：8min

電源：24Ｖ，電池交換３回/シーズン（58日）

使用可能日数（１回の電池交換）：１日14時間使用で16.5日間（水温４℃）

3.2.3　共通の仕様

イルカ方式と単純方式の両方に共通の仕様を次のように決めた。

送波器：円筒型圧電素子（直径36.5mm 長さ10.2cm）

指向性：水平方向360°，垂直方向40°（半減全角）

送波器駆動波形：矩形波

送波音圧：１ｍで85dB

筐体寸法：全長797mm，最大径380mm（ラジオブイ使用）

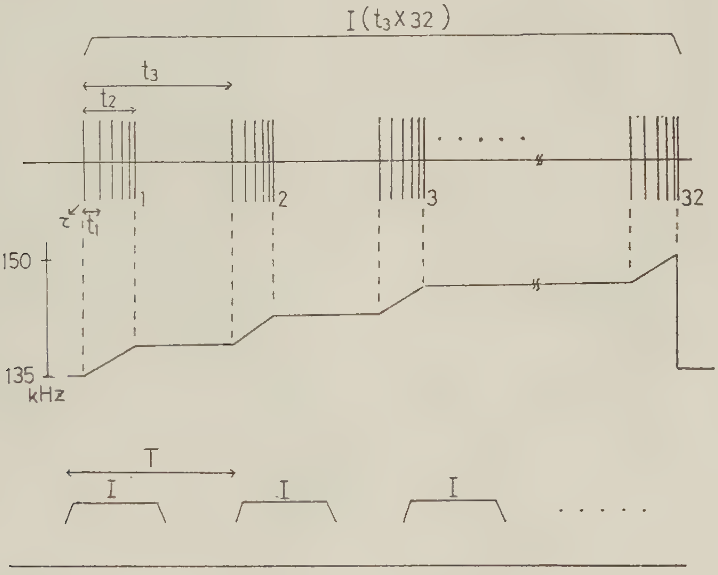
全重量：19kg

図６に音波発生器の全体図，図７に送波器の送波感度（k_s, 0dB＝1μbar/V-m）と送波音圧（P, 0dB＝1μbar/m）の周波数特性を示した。

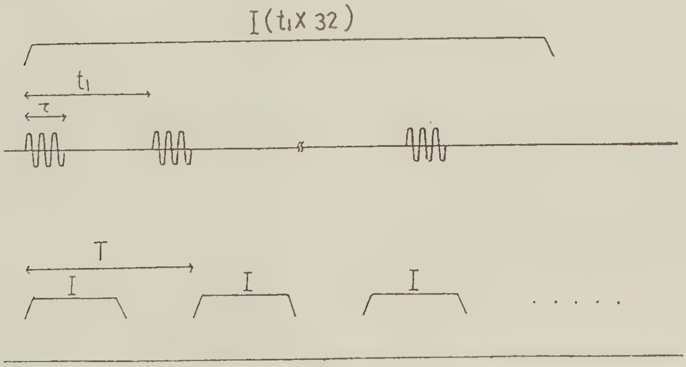
3.2.4　混獲防止機器のテスト結果

母船式サケ・マス業界のプロジェクトチームが，イシイルカのデータがないのでハンドウイルカの鳴音のデータからイシイルカに注意力と警戒心を喚起させる目的で，次のような仕様の9kHz 音波発生器と中空糸網を昭和55年度に試作し，昭和56年度から現地試験を行っている[9]。

∘ 9 kHz音波発生器



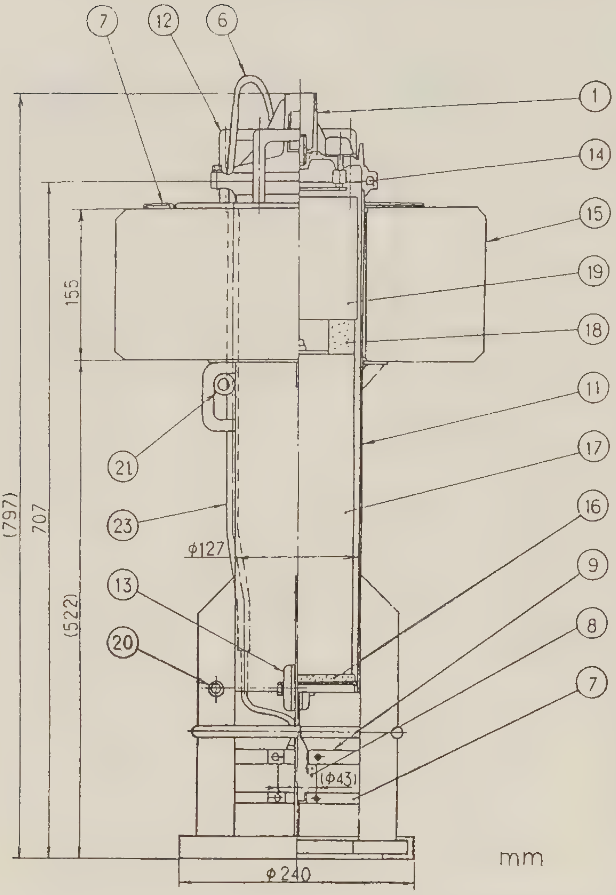
（a） Dolphin mode



（b） Simple mode

図５　超音波パルスの送波モード

Transmitting modes of supersonic pulses



23	ケーブル保護パイプ	SUS 304	1
22	銘板	～	2
21	係留環（上）	SS 41	1
20	係留環（下）	SS 41	1
19	本機	～	1
18	乾電池押えクッション	スポンジクッション	1
17	乾電池	～	1
16	乾電池クッション	スポンジクッション	1
15	浮子	ソフトロン	1
14	ドラムパッキン	ネオプレン	1
13	防食材	純 Aℓ	2
12	把手	SS 41	2
11	ドラム胴	SS 41	1
10	送波器取付金具（下）	SS 41	1組
9	送波器取付金具（上）	SS 41	1組
8	送波器	～	1
7	ケーブルパッケージ	帆布	2
6	キャブタイヤケーブル	ネオプレン	1
5	キャブタイヤケーブル引込口	$BsBM_1$	1
4	電源スイッチ	～	1
3	表示窓	アクリル	1
2	蓋締付ボルト	SUS 304	3
1	ドラム蓋	BC 2	1
符号	部品名	材質	1台当個数

図 6　音波発生器の全体図

Outline of sound generator

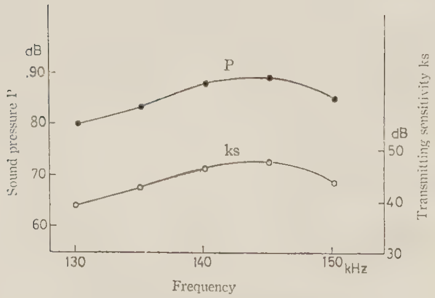


図 7　送波器周波数特性

Frequency characteristics of the transducer

周波数 *f*：9 kHz

筐体寸法：直径 5.6 cm，長さ 41 cm

送波音圧：1 mで40dB

送波モード：4 分間隔で16秒に 4 パルス

パルス巾：100ms

電源：6 V（単1 × 4 本）

使用可能日数：45日間（4 ℃）

重量：786 g

∘ 中空糸網（ナイロン）

中空糸の寸法：外径0.60mm，内径0.33mm

織込み方法：中央部水平方向に 3 本織込み

中空糸網は網糸の中心部の空気管により反射波を少しでも大きくして，網の近くで咄嗟の判断で避ける時に役立てようとするものであり，昭和58年からは 5 本を織込んだ網も使用している。

昭和57年度に試作した 145kHz 音波発生器は昭和58年から現地試験をやっている。現地試験の方法は統計学的に検討し，以下のように決定されている[9]。

昭和56，57年

- 3 本中空糸網……1 船団 3 隻　計12隻
- 9 kHz 音波発生器……1 船団 3 隻，計12隻，

表４　１操業当りの羅網イルカ数の相対比較

Comparison of entanglement rate of test boats with that of standard boats

		1981	1982	1983
中空糸網	3　本	55	62	90
	5　本			90
9 kHz 音波発生器		66	58	90
145kHz 音波発生器	イルカ方式			84
	単純方式			87
従来網		100	100	100

１隻10台

昭和58年

- ３本中空糸網……１船団３隻，計12隻
- ５本中空糸網……　〃　〃
- 9 kHz 音波発生器……１船団１隻，計４隻，１隻10台
- 145kHz 音波発生器
    - イルカ方式……１船団１隻，計４隻，１隻５台
    - 単純方式……　〃　〃　〃　〃　〃

業界のプロジェクトチームの現地試験[9]の結果を表４に示した。何もつけない従来網の１操業当りの混獲数を100として比較しているが，昭和56，57年度は34〜45％の減少であったが昭和58年度は10〜16％の減少になり，混獲防止効果が減っている。今後とも現場試験を継続すると共に，イシイルカの超音波パルスに対する反応行動観察からより効果的なシステムを開発していく必要がある。

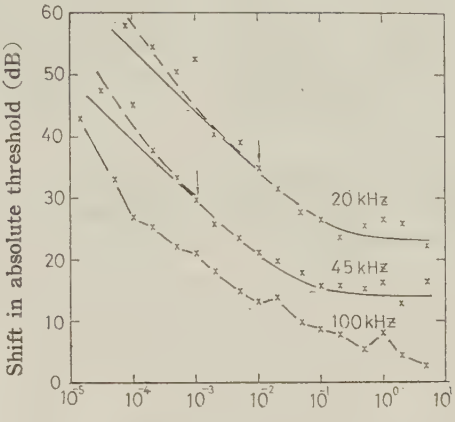


図８　ハンドウイルカのパルス持続時間に対する聴覚閾値の変化

Threshold versus pulse duration in the bottlenosed dolphin

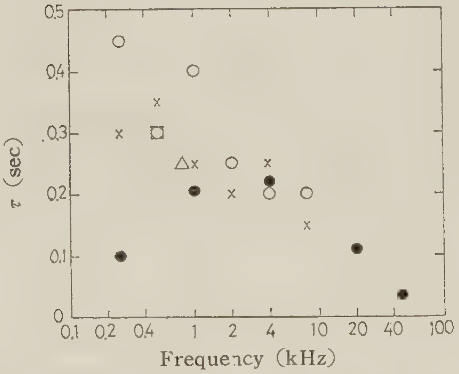


図９　ハンドウイルカと人間の聴覚の時定数

Auditory time constant of the bottlenosee dolphin (closed circle) and human (other marks)

3.3　音波発生器の到達距離

昭和56年度から低周波音波発生器（9 kHz）を，昭和58年度からは高周波音波発生器（145kHz）を北洋のサケ・マス流網に取付けて，イシイルカの羅網数を減少させる実験を行っているが，イシイルカに聴こえる距離到達距離を推定し取付個数を決める必要がある。

イシイルカの聴覚に関する実験データはないが，推定値を利用したり他のイルカのデータで代用したりして，パルスの持続時間とマスキング周囲雑音レベルなどによる聴覚閾値の変化を考慮しながら，イルカが音源方向へ向いている時の到達距離をグラフから求めた。

3.3.1　パルスの持続時間と繰り返し周期による聴覚閾値の変化

イルカの聴覚閾値（TH）は通常３秒位の長い持続時間の音波で測定しており，それが短くなれば耳の感度が悪くなる。イシイルカのデータはないが，Johnson(1967)[10]が行ったハンドウイルカについての実験ではパルスの持続時間に対する聴覚閾値の変化は図８のようになっている。人間と同じようにイルカも純音刺激の感知では音響エネルギーを積分しており，持続時間 t の刺激の場合の聴覚閾値の強度を I，非常に長い持続時間の場合の聴覚閾値の強度を I_∞，聴覚器官の時定数を τ とすると

$$I/I_\infty = 1 + \frac{\tau}{t} \quad \cdots\cdots(1)$$

の関係式が成立する。

人間とハンドウイルカの時定数を図９に示す。9kHz の時定数は0.15秒で，（１）式により $t=0.1$ 秒では TH

の増加量は4 dBである。145kHz近辺のデータがないのでの100kHzもので代用するとして，図8のグラフで最も長い持続時間のTHと100μs，50ms 持続時間のTHの差から，各持続時間のパルスに対するTHの増加量を各々24dB，7 dBとした。

人間の場合，毎秒数回以上のパルスの繰り返し音では，聴覚のエネルギー積分機能により聴覚閾値が減少して一発のパルス音の時より小さな音圧でも聴くことが出来る。イシイルカでも同じ現象が起る筈であり，イルカ方式では平均18ms間隔でパルスを発生しているので，人間のデータから類推してその減少量を11dBとした。

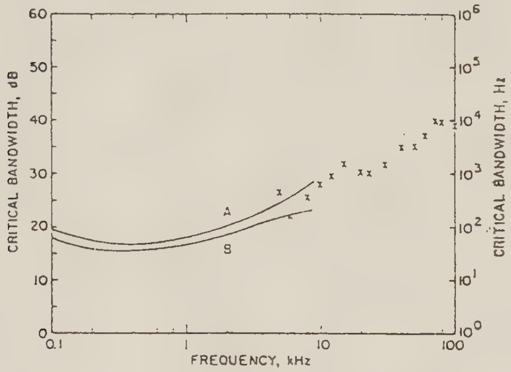


図 10　ハンドウイルカと人間の臨界帯域幅

Critical bandwidths of the bottlenosed dolphin (crosses) and human (A : monaural, B : binaural)

3.3.2　周囲雑音の影響

人間と同じようにイルカの場合も広帯域の周囲雑音が存在する水中で音を聴く時，その音刺激の周波数の近くの比較的狭い帯域の雑音のみがマスキング効果を有する。その臨界帯域巾（BW）は，連続広帯域雑音中で純音の聴覚閾値（TH_n）を測定すると，周囲雑音スペクトラムレベル（NJ）とイルカの受波指向性利得（DI）を含んだ次式から計算できる。

$$TH_n = NJ + BW - DI \qquad \cdots\cdots(2)$$

イシイルカのデータがないので，Johnson (1968)[11]が測定したハンドウイルカの臨界帯域巾（図10）を利用した。9kHzのBWは28dBであり，145kHzのBWについては100kHz以上の測定が行われていないが，100kHz付近の曲線の傾斜がゆるやかなので100kHzのBW（40 dB）を代用した。

Knudsenの風速をパラメータとした深海の平均雑音スペクトラムから，9kHzのNJは海況1で−64dBre 1 μbar/$\sqrt{Hz}$，海況3で−54dB，海況6で−47dBであり，145kHz付近のNJは海況1，3でMellenの熱雑音が優勢となり海況に関係でなく−70dB，海況6で−68dBとなっている。

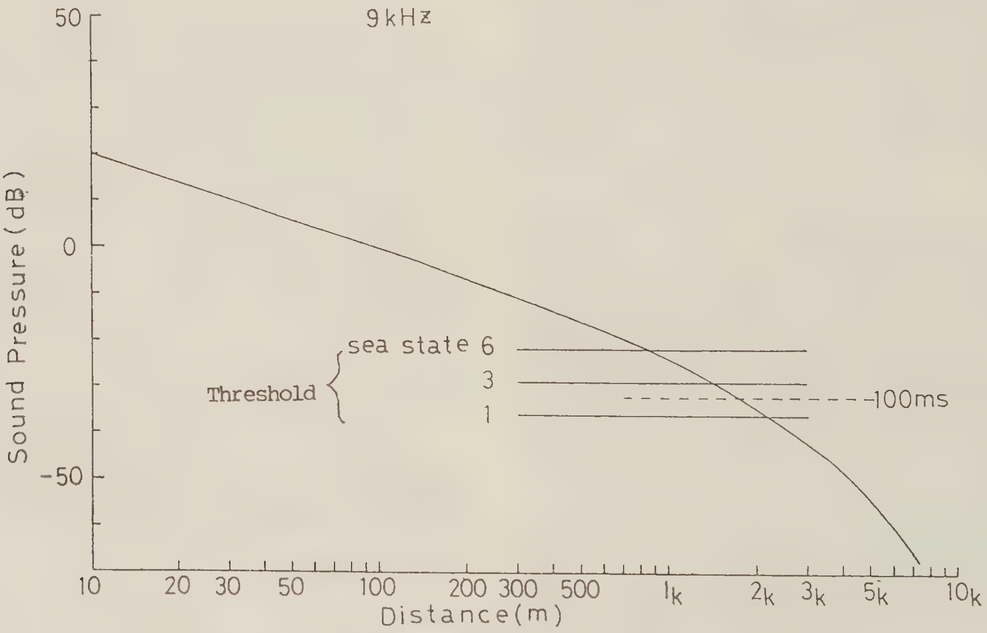


図 11　到達距離の決定（9 kHz）

Determination of effectve range at 9 kHz

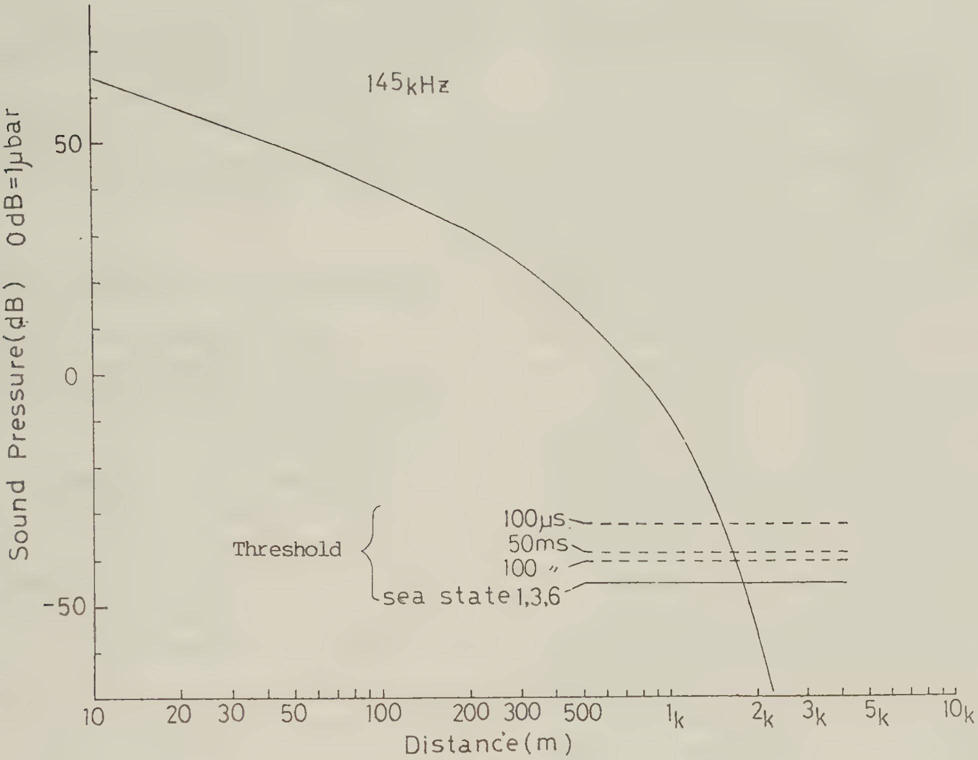


図 12　到達距離の決定（145 kHz）
Determination of effective range at 145 kHz

表 5　音波発生器の到達距離
Effective range of sound generator

	到達距離（m）		
	9 kHz	145kHz	
		イルカ方式	単純方式
海　況　1	2,400（1,200）	1,760（1,530）	1,760（1,530）
〃　3	1,480（　680）		
〃　6	850（　340）		
パルス幅　100ms	1,800（　860）		
〃　50ms			1,600（1,400）
〃　100μs		1,480（1,280）	

*Au*ら(1974)[7)]が報告している周囲雑音スペクトラムレベルと実効マスキング雑音レベルの推定値から *DI* を計算してみると，50kHzで 17dB，145kHz で 23dB あり，9kHz の *DI* は 3dB と推測した。

3.3.3　到達距離

水平伝播の吸収損失係数は，10kHz で 4.0dB/km，145kHzで37dB/km とした。イシイルカの *TH*は，Awbreyら[5)]が解剖所見から推定した値を用い，10kHz で −36dB，145kHzで−45dBとした。図11，12のように音波発生器から出た音波の距離減衰曲線と 3.3.1〜2 の項により補正された *TH* が交叉する点から到達距離(*R*)を求め表5に示した。3.3.1の項により補正された *TH*は，145kHzのイルカ方式（100μs）で−32dB，単純方式（50ms）で−38dB，9kHz（100ms）で−32dBとした。また3.3.2の項による補正に関しては，145kHz では(2)式が海況1〜6で −45dB 以下となるので，*TH*=−45dB とし，9kHz の *TH* は海況1で −39dB，海況3で −29dB，海況6で −22dB とした。

聴覚閾値を 10dB 増加させ，10dB の余裕度をとった場合の到達距離（R_{10}）を括弧して同じく表5に示した。

パルス音波におけるマスキング雑音と聴覚閾値の関係についてデータがないので，海況による周囲雑音とパルス持続時間とは各々独立した影響要因として有効距離を求めた。従って両者のデータを比較し，小さい方の値をその音波発生器の有効距離と考えるべきであろう。

9kHz の R_{10} は*R*の 40〜50%の値に減少しているが，145kHz では吸収減衰が大きいので 1km付近の減衰曲線の傾斜が大きく，*TH* の増加の影響が少なくなり R_{10} は *R*の90%位の値である。

イルカが発する超音波ビームの指向性に関しては，200kHzで 4℃，150kHz で 10°，100kHz で 24°，50kHz で 34°というデータ[12)]があり，受波でも指向性利得（*DI*）で示されるように低周波の方が広い指向性を有するので，イルカの体軸と音波発生器のビームとの間の角度の許容範囲を広くする点からは低周波音波発生器が有利である。

音源の送波レベル，持続時間，送波器の寸法が同じなら，150kHz 位までは吸収損失，送波器の垂直方向の指向性，臨界帯域巾に関しては低周波の方が，また聴覚閾値とその時定数，周囲雑音，受波指向性利得に関しては高周波の方が到達距離を大きくする点において有利である。

9kHz における海況の影響は，海況1→3→6と雑音が増加するにつれて *R*が約60%の値に減少しているが，145kHz ではマスキング雑音レベルが小さく海況により *R*は変化しない。

各パルスの持続時間による *R* と平均的海況3による *R* とを比較し小さい方をその音波発生器の到達距離とすると，9kHz 音波発生器で 1480m，145kHz のイルカ方式で1480m，単純方式で1600mとなる。実際に1個の音波発生器の有効範囲は直径（2*R*=3.0〜3.2km）の円となり，330反のサケマス流網に5個取付ければ良いことになる。

3.4　流網の反射損失とイルカの検知可能最大距離

イシイルカが何mまで接近したら流網の存在を認知するかは，イシイルカの羅網の原因を究明し，その数を減少させる技術を開発するために必要な基礎データである。そのためにイシイルカのクリックスと同じような周波数・パルス巾の超音波パルスで，網を構成している素材（網糸，網地，浮子，沈子，ロープ）の反射損失を測定した。その反射損失，イシイルカのクリックスの特性（周波数，パルス巾，音圧），反射物体の検知閾値レベル，周囲雑音のマスキング効果などから，イシイルカが網の存在を検知できる最大距離を計算した。

3.4.1　測定装置

当研究所の試験水槽（L 60m×W 4 m×D 2 m）に，図13に示すように測定装置と反射物体を配置し，反射物体と水中マイクロホンの距離を変えながら反射波を測定し，反射損失（*RL*）を求めた。
測定装置の主な仕様は以下のとおりである。

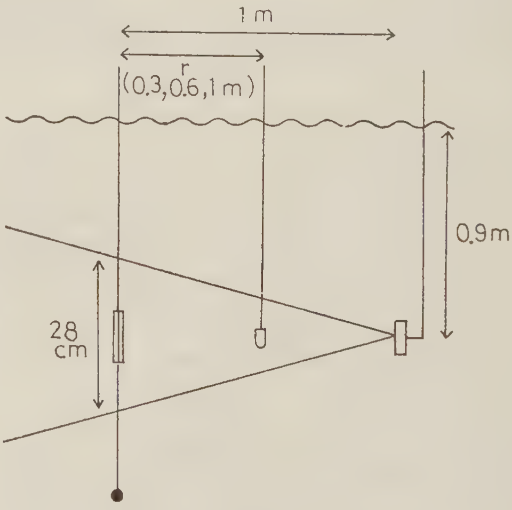


図 13　反射損失測定配置図
Experimental configuration of measurement of reflection loss

表6　測定試料の寸法・形状と反射損失

Configuration, size and reflection loss of measured samples

測定試料		反射損失	寸法・形状
木枠に張った網地	1. 商業用網地	55	網地を木枠（148×185cm）に張る。 中空糸が木枠の横中央部に来るように設置する。
	2. 中空糸3本網地	52	
	3. 中空糸5本網地	51	
コイル状にした網地・網糸	4. 商業用網地	50	網地は30本の糸から成り，その糸の全長は57m，結節の数は495である。 ℓ =1.9m，ϕ =12.7cm，T=4
	5. 商業用網糸（糸の太さ 0.5mm）	54	ℓ =10m，ϕ =11.0cm，T=28，d_1=0.50mm
	6. 中空糸（直径0.5mm）	54	ℓ =10m，ϕ =12.5cm，T=32，d_1=0.52mm，d_2=0.20mm
	7. 中空糸（直径0.6mm）	48	ℓ =10m，ϕ =12.0cm，T=30，d_1=0.60mm，d_2=0.33mm
	8. 中空糸（直径0.8mm）	45	ℓ =10m，ϕ =10.2cm，T=31，d_1=0.80mm，d_2=0.31mm
	9. 中空糸（直径1.0mm）	41	ℓ =10m，ϕ =14.0cm，T=22，d_1=1.0 mm，d_2=0.31mm
	10. 網糸（直径1.0mm）	42	ℓ =10m，ϕ =13.5cm，T=16，d_1=10mm
11. 沈子		39	w=75g，d_1=21mm，d_2=10mm，ℓ =31mm
12. 浮子（ビニール・クロライド）		25	w=50g，d_1=46mm，d_2=9.0mm，ℓ =154mm
13. 沈子綱（ポリプロピレン）		33	ℓ =69cm，d_1= 7 mm

⑴　送波装置

周波数：143kHz

送波器寸法：100mmϕ

指向角：16°（半減全角）

パルス巾：100μs

送波音圧：104dB at　1m（0dB=1μbar）

⑵　水中音測定装置

水中マイクロホン：B&K 8103型

増巾器：B&K 2635型

3.4.2　測定試料と測定方法

反射損失の測定試料は，木枠に張った網地（モノフィラメント商業用網，3本中空糸網，5本中空糸網），コイル状に巻いた商業用網地と網糸（糸の直径0.5，1mm）と中空糸（糸の直径0.5，0.6，0.8，1.0mm），浮子，沈子，沈子綱の計13種類である。その形状と寸法を表6と図14に示した。

試料に気泡や水面の浮遊物など反射波を見掛け上大きくするものが付着しないように注意し，ロープは長時間水に浸し，水に良くなじんだものを使用した。送波器から1mの距離における超音波ビームの直径は28cmであり，そのビーム内の商業網のフイラメントの長さは約2.2mとなる。この程度の長さではS/Nの良い測定が行えないので，長さ10mの糸をビーム直径の½（14cm）以下のコイル状にし反射損失を測定した。

コイル状の試料の寸法は，全長をℓ，コイルの平均直径をϕ，巻数をTとし，中空糸については外径をd_1，内径をd_2とし，糸はその直径を名称の後に括弧して記入するものとする。

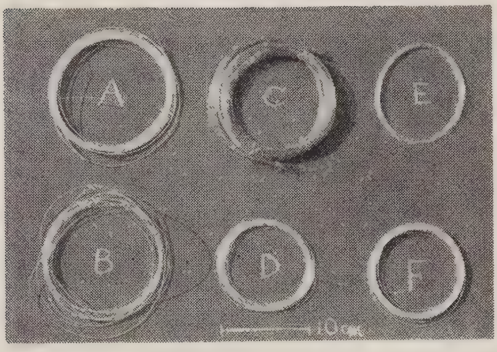
コイル状の試料はコイルの作る面が超音波ビームに対し直角にする必要があり，図15のように最も細い商業用網糸（0.5）を使ってコイルの下部一個所に小さな錘をゆるく縛って吊り下げ，同じく上部個所をゆるく縛って2方向から吊り下げ，コイルの円形を保ちながらその面の方向を調整できるようにした。

表6とは別に，理論的な反射損失が計算できる鋼球（高炭素クロム鋼，直径50.8mm）を使って，測定値と計算値が一致することにより，測定システム全体の校正を行った。

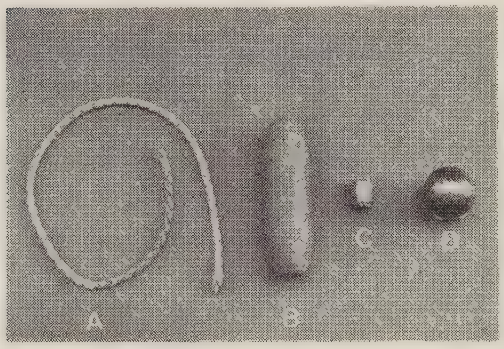
3.4.3　測定結果と考察

⑴　測定結果

図16に例として校正用鋼球，商業用網糸（0.5），網糸（1.0），浮子の各反射波の距離減衰曲線を示した。測定試料の位置における入射波の音圧をP，試料から1mの距離における反射波の音圧をP_{r1}とすると，反射損失



A　中空糸（1.0）　　D　中空糸（0.5）
B　網　糸（1.0）　　E　網　糸（0.5）
C　商業用網地　　　F　中空糸（0.8）



A　沈子綱　　C　浮　子
B　沈　子　　D　鋼球（直径50.8mm）

図 14　測定試料の写真

Photographs of measured samples

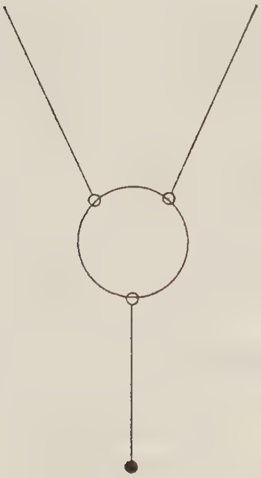


図 15　コイル状にした網糸の吊り下げ方法

schematic view of hanging filament coil

（*RL*）とターゲットストレングス（*TS*）は次式で表わされる。

$$RL = -TS = 20\log\frac{P}{P_{r1}} \qquad \cdots\cdots(3)$$

距離をr，鋼球の半径をa，波長定数をkとすると，球が大きく$ka \gg 1$，$r > a$の条件を満足する時反射損失は，

$$RL = -10\log\frac{a^2}{4} \qquad \cdots\cdots(4)$$

で与えられ，直径50.8mmでは$RL = 37.9$dBであり，図16から求めた値と一致した。

各試料の反射損失の測定結果を表6に示したが，それらから次のことが分る。

① 木枠に張った網地の反射損失は，単一素材の商業用網地に比べ3本，5本中空糸網の方が各々3，4dB小さい。

② 網糸と中空糸の反射損失は，糸の直径が2倍になると約12dB小さくなり，直径の2乗に比例した反射波となっていることが分る。

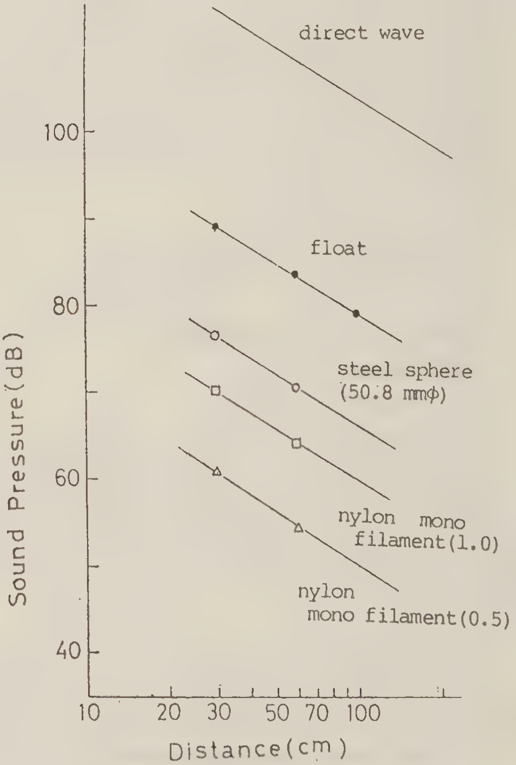


図 16　代表的な測定試料の反射波の距離減衰

Examples of attenuation of reflective waves

③　直径 0.5mm と 1.0mm の網糸と中空糸の比較では，反射損失に殆んど差がなく，内径と外径の比が 0.3～0.4 では中空糸の空気の効果が現われていない。

④　流網を構成している素材では浮子の反射損失が最も小さく，次いで沈子綱，沈子，網地の順である。

浮子と沈子の取付間隔は各々 110cm，65cm で沈子綱は2本であり，イシイルカと流網の距離が大きく，流網の位置におけるイルカのエコーロケーションの超音波ビームの直径が大きくなると，反射に寄与する個数と長さが増加するので網地だけの時より反射損失が小さくなり，イルカにとって流網の存在を認知し易い。イルカの超音波ビームの角度を 10° とすると，34mの距離でビーム直径が6mとなり，それより遠い地点では網の上端から下端まで全体的な反射波を受けることができイルカは先づ浮子，沈子綱，沈子の反射波により流網の存在を知って警戒心を喚起し，更に接近して網地を認識するものと考えられる。

⑵　糸と網の反射損失

Welsby & Goddard (1973)[13]が糸，網，薄いプラスチックシートについて，入射波に対しランダムな方向の面を有するようにしわくちゃにした状態の反射損失を求める次の（5）～（8）式を導き出している。

無限長の半径 a のフイラメントに対し垂直に音圧 P の平面波が入射した場合，フイラメントから距離 r における反射音圧 P_{rf} は次式で表わされる。

$$P_{rf}=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}}(ka)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{a}{r}\right)^{1/2}KP \qquad \cdots\cdots(5)$$

但し，K は水とフイラメントの材質の物理的特性により決まる定数で，体積弾性率と密度を各々 A，ρ とし，水とフイラメントで添字1，2を付けるとすると次式で表わされ，ナイロンの場合で 0.78 である。

$$K=\frac{A_1-A_2}{A_2}+\frac{2(\rho_2-\rho_1)}{\rho_2+\rho_1} \qquad \cdots\cdots(6)$$

（6）式を半径（a）と周波数（f）について書き直すと $P_{rf}\propto a^2f^{1.5}$ となり，半径の2乗，周波数の 1.5 乗に比例して大きくなることが分る。

長さ ℓ のフイラメント n 本がランダムな角度で音源からほゞ同じ距離に存在し，平面波でなく超音波ビームに角度巾（α）がある時の反射音圧 P_{rn} は，全長を $L-nl$ とすると，

$$P_{rn}=\frac{(k_a)^{\frac{3}{2}}(aL)^{1/2}KP}{4r} \qquad \cdots\cdots(7)$$

で表わされる。（7）式はフイラメントの形状に無関係であり，網の場合メッシュの一辺の長さを d，網の面積を とすると，

$$L=\frac{2S}{d} \qquad \cdots\cdots(8)$$

となる。

今回の測定のようにコイルと網では，フイラメントの作る面が入射ビームに対しほゞ直角で各部分がかなりの高い確率で音源方向へ反射するので，（7）式に補正係数（B）を掛ける必要がある。

$$P_{rn}=\frac{(ka)^{\frac{3}{2}}(aL)^{1/2}KP}{4r}\cdot B \qquad \cdots\cdots(9)$$

表6のコイル状の網糸（0.5，1.0）の反射損失の測定値は各々 54dB，42dB であり，（7）式による計算値は各々 64dB，52dB で両方とも測定値より 10dB 大きく，B を 3.2 とすれば良いことが分った。

鋼球のように $A_2\gg A_1$，$\rho_2\gg\rho_1$ の場合，$K_2=3$ となりナイロンより 11.7dB だけ反射損失が減少する。逆に空気管では $A_2\ll A_1$，$\rho_2\ll\rho_1$ となり，音響インピーダンスのミスマッチングによる反射は鋼線の場合と同じであり，位相が反転して $K=-3$ となると考えられる。（9）式の B を 3.2 として，長さ10mのナイロンと空気管をコ

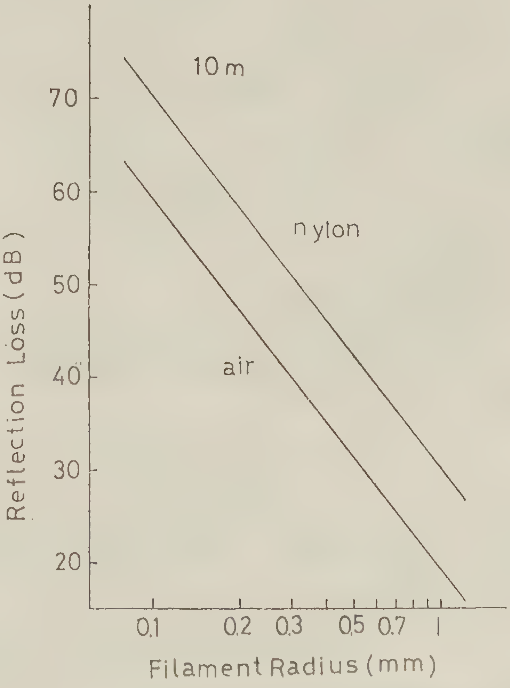


図 17　コイル状の網糸と空気管の反射損失の計算値

Calculated reflection losses of coils of nylon monofilament and air tube

表 7　中空糸の空気管による反射損失の減少

Decrease of reflection loss by air tube of nylon air tube thread

	糸の太さ（mm）			
	d_1＝1.0 d_2＝0.31	d_1＝0.8 d_2＝0.31	d_1＝0.60 d_2＝0.33	d_1＝0.52 d_2＝0.20
(1)　網糸の計算値（d＝d_1）	42dB	46dB	51dB	54dB
(2)　空気管の計算値（d＝d_2）	51	51	50	59
(3)　中空糸の測定値（d＝d_1，d_2）	41	45	59	54
(1)—(3)　空気管による減少値	1	1	3	0

d_1＝外径，d_2＝内径（空気管の径）

イル状に巻いたものの反射損失を計算して図17に示した。

中空糸の外径と同じ太さのナイロン網糸と，その内径と同じ太さの空気管について長さ10mのコイルの反射損失を計算し，中空糸の測定値と対比して表7に示した。中空糸(0.6)以外は空気管による反射損失の減少が0～1dBで改善効果があまりない。それは表7の(1)と(2)が同じ位の値になって初めて空気効果が現われることを示し，内径／外径が0.6以上である条件が必要となる。

送波器から1mの距離における超音波ビームの半径は14cmでその面積は616cm^{2}であり，(8)式のdを5.7cmとして(7)式から計算した反射損失は71dBとなり，測定値(55dB)より16dB大きい。従って網の場合の補正係数Bは6.4とする必要がある。サケマス流網には結節があること，コイル状網糸に比べ網地の作る面が1つで反射波の位相が一致し易いことにより反射損失が小さくなっていると思われる。

(3)　網の結節による反射

体積弾性率と密度が水とわずかに異なる小物体の反射波は，最大寸法が波長に比べ小さいならば物体の形状に関係なく次式で与えられる[14)]。

$$\frac{P}{P_r}=-\frac{k^2Q}{4\pi r}\,e^{-jkr}\left(\frac{\varDelta A}{A}+\frac{\varDelta\rho}{\rho}\cos\theta\right)\quad\cdots\cdots(10)$$

但し，入射音圧をP，小物体から距離rにおける反射音圧をP_r，小物体の体積をQ，水の体積弾性率と密度及びそれらの小物体との差を各々A，ρと$\varDelta A$，$\varDelta\rho$，入射方向と反射方向の角度をθとする。

$\theta=0°$とし，位相と符号を除い反て射損失（RL）は次式で表わされる。

$$RL=-20\log\frac{k^2Q}{4\pi}\left(\frac{\varDelta A}{A}+\frac{\varDelta\rho}{\rho}\right)\quad\cdots\cdots(11)$$

上式の最後の項をナイロンの場合のKと同じ0.78とし，結節の直径を2mmとするRL＝80dBとなる。網の位置における超音波ビームの直径が28cmであり，20個の結節が含まれることになり，反射波の位相が同じ場合で26dB，ランダムな場合で13dBだけ反射損失が減少し，各々の反射損失は54，67dBである。無結節網の反射損失の計算値が61dB，実際の流網の反射損失の測定値が55dBであり，結節の反射波の合成の仕方によっては結節の存在が大きく影響すると考えられる。

(4)　反射率の異なる網糸を一部編込んだ網の反射損失

異なる反射率の2種類の網糸を使った網で，超音波ビームが当っていて反射に寄与する2種類の網糸の部分について(9)式の（a，L，K，P_{rn}）を各々（a_1，L_1，K_1，P_{rn1}），（a_2，L_2，K_2，P_{rn2}）とし，それぞれの反射損失をRL_1，RL_2とすると，両方の反射波を総合した反射波（P_{rn}）と反射損失（RL）は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}P_{rn}&=({P_{rn1}}^2+{P_{rn2}}^2)^{1/2}\\&=\frac{BPk^{\frac{3}{2}}}{4r}({a_1}^4L_1{K_1}^2+{a_2}^4L_2{K_2}^2)^{1/2}\quad\cdots\cdots(12)\end{aligned}$$

$$RL=-10\log(10^{-\frac{RL_1}{10}}+10^{-\frac{RL_2}{10}})\quad\cdots\cdots(13)$$

図18のように3本の中空糸を網の中央部に水平に編込んだ中空糸網で超音波ビームを中心にくるように設定した場合，商業用網糸と中空糸の長さは各々142cm，78cmであり，各々の反射損失の計算値は53.5dB，56.9dBで総合反射損失は51.9dBとなる。5本中空糸網では各々の長さが110cmで等しく，総合反射損失の計算値は51.0dBである。両方とも表6の測定値とほゞ一致している。

(5)　イシイルカの網の検知可能最大距離

雑音中のイルカのエコーロケーション能力の評価方法

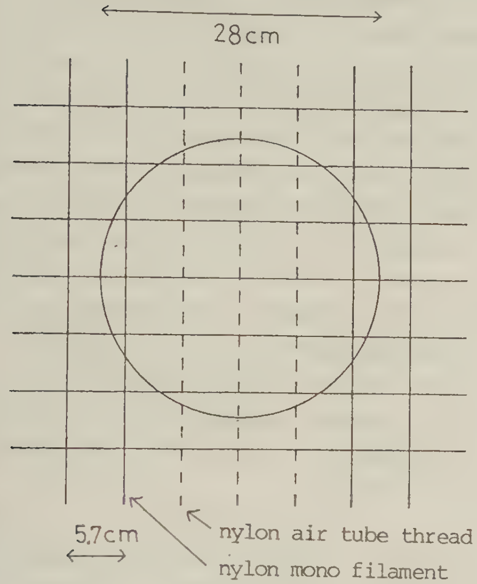


図 18　中空糸網に当る超音波ビームの模式図
Schematic view of supersonic beam and filament of gill net

に3とおりある。

① 最初の方法は下記のソーナー方程式を使って，イルカの反射物検知閾値レベル（DT）を求めるものである。

$$DT=(SL-2TL+TS)-(NJ+BW-DI) \qquad \cdots\cdots(14)$$

SL は1mの距離におけるクリックスの送波レベル，$2TL$ は往復の伝播損失，TS は反射物のターゲットストレングス，NJ は周囲雑音スペクトラムレベル，BW はイルカのクリックスの周波数における臨界帯域巾，DI はイルカの受波指向性利得である。右辺の最初の括弧はイルカが受波する反射物体からのエコーレベルであり，2番目の括弧はイルカが感じるマスキング雑音レベルである。

Au & Snyder (1980)[15]は，ハンドウイルカが直径7.62cm厚さ0.81mmのステンレス球に水を充たしたものを113mの距離まで検知できた実験から(14)式を計算して，DT=3.8dB を得ている。同じくMurchison & Penner (1975)[16]が行った半径2.54cmの鉄球を72.3mの距離でハンドウイルカが50%の正確さで検知できた実験から，ほゞ同じ値の DT が計算できるとしている。

② 2番目の方法は，反射物検知実験での正確回答を示す時のエコーエネルギー束密度（S）と単位バンド巾当りのノイズパワー（N）の比（S/N）を求めるやり方である。

Au & Penner (1981)[17]は，ハンドウイルカに対しマスキング雑音を人工的に発生させ上記の直径7.62cmのステンレス球を距離16.5mで検知させる実験から，N/S=7.4〜12.8dB の結果を得ている。

③ 雑音が小さくなり聴覚閾値に影響を与えない場合，エコーレベルが聴覚閾値になるまで反射物を検知できるという条件で，おゝまかにイルカのエコーロケーション能力を評価できる。

①，②，③の3とおりの方法で求めた検知可能最大距離を各々 R_1, R_2, R_3 とする。

イシイルカのクリックスの周波数，音圧，パルス巾，パルス間隔を測定データから145kHz，68dB，50μs，100ms とし，DI，水平伝播吸収損失係数，雑音スペクトラムレベルは3.3の項で検討した値を使用することとし，各々23dB，37dB/km，海況1，3，6で−70，−70，−68dB とした。

3.3項の検討に基きパルス巾50μsによる聴覚閾値の増加量を30dB，パルス間隔100msによる聴覚閾値の減少量を4dBとし，それらから補正後の TH を−19dBとした。また，DT を4dB，S/N を10dBとした。

流網とイルカの間の距離が増加すると，エコーロケー

表 8　イシイルカの流網検知可能最大距離
Dall's porpoise's maximum detectable range of the gill net

	検知可能最大距離（m）				
	R₁		R₂		R₃
	海況1，3	海況6	海況1，3	海況6	
浮子棚（RL=20dB）	140	130	100	93	40
沈子棚（RL=25dB）	120	110	83	76	30
中空糸網（RL=45dB）	51	46	33	20	11

ションの超音波ビーム内に含まれる浮子，沈子網，沈子，網地の数及び面積が増加し反射損失が減少する。詳細には距離函数としての反射損失を測定し最大距離を求めなければならないが，大まかな目安を得るため表6の測定結果から浮子棚，沈子棚，3本中空糸網の反射損失を各々20，25，45dBとして，$R_{1\sim3}$を計算し表8に示した。

R_1とR_2はR_3に比べかなり大きな値になっている。R_1は比較的周囲雑音の大きい浅い湾内の検知実験データに基く計算結果であり，R_2は人工的に雑音を発生させた検知実験データに基く計算結果であり，共に高雑音環境で妥当な検知距離を得られるが，今回のように深海での低雑音環境では予想以上に大きい値となってしまう。事実，R_1とR_2の場合のイルカが受波するエコーレベルを計算してみると，イルカの聴覚閾値以下となり非現実的なものとなっている。

雑音スペクトラムレベルが −50dB 以上では，①又は②から計算する方法（R_1，R_2）を，また−50dB以下では③から計算する方法（R_3）を採用すべきといえる。

検知可能最大距離を増加させる要因は，イシイルカのクリックスの送波レベルの増加，反射損失の減少などであり，それを減少させる要因は降雨・強風などによる雑音レベルの増加，気泡の発生と海面下への巻き込みなどである。Au ら[15]が実験に使ったハンドウイルカのクリックスの音圧は120dBであり，水槽で飼われているイルカの70dBに比べると50dBも大きい。水槽など狭い環境に飼われているイルカは自然状態より30dB位小さい音圧しか発生しないともいわれ，イルカは最大出力のエコーロケーションをやっていないと考えられる。今回計算に使用したイシイルカのクリックスの情報も大きな船体に接近する時のものであり，自然界の音圧より小さい可能性があるので今後の検討課題である。DT，S/Nはハンドウイルカの実験データを使っているので，イシイルカのデータに置き換え修正していく必要がある。

R_3の値から分るように浮子棚，沈子棚は30〜40mの距離から検知できるので，イルカはエコーロケーションの超音波ビームを上下左右に振り，先づ浮子棚，沈子棚の存在をかなり遠くから検知し警戒心を強め，更に接近してから網地そのものを認知し，通常は避けるものと思われる。

4. 結言

イシイルカのサケ・マス流網への羅網に関する問題の背景と昭和59年度までの対策の経過の概要を述べると共に，イシイルカのエコーロケーションと聴覚の能力を調べるための測定と試算を行い，混獲防止用音波発生器の試作と現場試験も行った結果，次のことが分った。

① イシイルカのエコーロケーション・クリックスは，周波数 145kHz 近辺のきれいな正弦波で，パルス巾は50〜60μs，1連のパルス数は9〜47個，その間隔は8〜150msであり，細かく見ると1〜4個の連発パルスで1mの距離における音圧は65〜70dBである。ホイッスルと低周波クリックスは発生していない。

② イシイルカと同種のリクゼンイルカのクリックスは周波数 130kHz 近辺のきれいな正弦波で，パルス巾は36〜206μs，1連のパルス数は20〜148個，その間隔は2〜16msで純然たる1個のパルスであり，1mの距離における音圧はイシイルカと同じく65〜70dBである。

③ イシイルカのクリックスの分析データに基き，145kHz 近辺の周波数で周波数・パルス間隔を変化させるイルカ方式とそれらを一定とする単純方式の2種類の混獲防止用音波発生器を試作した。従来の商業網と比較する現場試験では，昭和56，57年度の中空糸網，9kHz 音波発生器では34〜45％程混獲数が減少したが，昭和58年度の中空糸網，各種音波発生器では10〜16％の減少に変り，今後とも継続して調べる必要がある。

④ 9kHzと145kHzの音波発生器について，音波の継続時間と周囲雑音などにより補正した聴覚閾値からイシイルカに聴こえる範囲（到達距離）を求めると約1,500mとなり，サケ・マス流網1ケ統（330反）に必要な音波発生器の個数は5個である。

⑤ 流網を構成している素材では浮子の反射損失が最も小さく，次いで沈子網，沈子，網地の順である。網糸の反射損失は糸の直径が2倍になると約12dB小さくなり，直径の2乗に比例した反射波となっている。木枠に張った網地の反射損失では，従来の商業網地に比べ3本，5本中空糸網の方が各々3〜4dB小さい。中空糸の内径と外径の比が0.6以上にならないと中の空気管の効果が現われない。

⑥ イシイルカが流網を検知できる最大距離について3種類の方法で検討したが，比較的雑音の小さい海ではエコーレベルが聴覚閾値に等しいという条件で計算する方法が妥当であると考えられる。その方法によれば，浮子棚，沈子棚，3本中空糸網の反射損失を各々20，25，45dBとすると，検知可能最大距離は各々40，30，11mとなった。

⑦ イシイルカはエコーロケーションの超音波ビーム

を上下左右に振って，先づ浮子棚，沈子棚の存在をかなり遠くから検知して警戒心を強め，更に接近してから網地そのものを認知し，通常は避けるものと思われる。

⑧　流網の近くで遊んでいる時（playing），単純な不注意で羅網することが多いと考えられるので，注意力と警戒心を常に喚気させ，咄嗟の判断をする時少しでも網の存在を認知し易くする必要がある。

今後は，色々な超音波パルスをイシイルカに向けて放射した反応行動観察結果により効果的な音波発生器を開発し，現場試験を継続していく必要がある。エコーロケーション能力の評価と音波発生器の到達距離の計算については，イシイルカ自体の実験データで修正していかなければならない。

参考文献

1）小達繁・伊藤準・加藤守：1978—1982年北太平洋におけるさけ・ます漁業に関連した海産哺乳動物の調査報告，遠洋水産研究所，pp. 1-23，1983.

2）矢島信一ほか：さけ・ます流し網漁業における海産哺乳類の混獲防止技術開発に関する緊急調査報告書，水産工学研究所，pp. 1-24，1982.

3）Ridgway，S. H.：Dall porpoise, *Phocoenoides dalli* (True)：Observations in captivity and at sea, Norsk Hvalfangst-Tidende pp. 97-110, 1966.

4）Leatherwood, J. S. and D. K. Ljungblad: Background research in support of a proposed method for reducing mortality of Dall's porpoises, *Phocoenoides dallis*, in the Japanese Pacific high seas fishery for salmon, Contract Report to Marine Mammal Div., National Marine Fisheries Service, 1979.

5）Awbrey, F.T. et al: The bioacoustics of the Dall's porpoise-salmon driftnet interaction. H/SWRI Technical Report 79-120, 1979.

6）Evans, W. E.: Echolocation by marine delphinids and one species of fresh-water dolphin, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 54, No. 1, pp. 191-199.

7）Au W.W.L. et al: Measument of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* Montagu, in open waters, J. Acoust. Soc. Am., 56(4), pp. 1280-1290, 1974.

8）Mϕhl B. and S. Andersen: Echolocation: high-frequency component in the click of the Harbour Porpoise(*Phocoena ph .L.*), J. Acoust. Soc. Am., Vol. 54, No. 5, pp. 1368-1372, 1973.

9）Kumagai J. et al: Gear experiment in order to prevent incidental take of Dall's porpoises conducted in 1981. Document for INPFC pp. 1-16，1982.

10）Johnson C. S.: Relation between absolute threshold and duration of tone pulse in the bottle-nosed porpoise, J. Acoust. Soc. Am. 43 (4)，pp. 757-763，1967.

11）Johnson C.S.: Masked tonal thresholds in the bottle-nosed porpoise. J. Acoust. Soc. Am. 44 (4)，pp. 956-967，1968.

12）Norris, K.S. et al: Directionality of echolocation clicks in the rough-tooth porpoise, *Steno bredanensis*(Lesson). Marine bio-acoustics Vol. 2, pp. 305-315, 1966. Pergamon Press, Oxford.

13）Welsby, V.G. and G.C. Goddard: Underwater acoustic target strength of nets and thin plastic sheets J. of Sound and Vibration, 28(1), pp. 139-149，1973.

14）Rayleigh, J.W.S.: The Theory of Sound, Vol. 2, 149, 1945.

15）Au, W. W. L. and K. J. Snyder: Long-range target detection in oper waters by an echolocating Atlantic bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*). J. Acoust. Soc. Am. 68(4)，pp. 1077-1084. 1980.

16）Murchison, A.E. and R.H. Penner: Open water echolocation in bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). Conference on the biology and conservation of marine mammals, University of Calif., Santa Crus. December 4-7(A), 1975.

17）Au, W. W. L. and R. H. Penner: Target detection in noise by echolocating Atlantic bottelnose dolphins. J. Acoust. Soc. Am. 70, pp. 687-693，1981.

Acoustic Study on the Reduction of Entanglement of Dall's Porpoise in the Gill Net in the Bering Sea (Part 1)

By

Yoshimi HATAKEYAMA, Ken ISHII and Hajime TAKETOMI

Summary

Marine mammals, particularly Dall's porpoises, get incidentally entangled in gill nets of Japanese mothership salmon fishery in the Bering Sea. Maximum total number of Dall's porpoises to be caught in a year has been fixed by a U.S. act and Japanese fishermen are now virtually obligated to use techniques and devices to reduce the incidental catch in the gill nets.

Since 1981 authors have measured Dall's porpoises' echolocation clicks, estimated their echolocation ability, developed sound generators to prevent their entanglement in the gill nets and estimated effective ranges of the sound generators.

The investigations have led to the following conclusions:

1) Dall's porpoise emits simultaneously one to four short high frequency pulses with frequency of about 140 kHz, pulse width of 50 to 60 μs and peak sound pressure of 65 to 70 dB at 1 m.

2) 145 kHz sound generators (dolphin mode and simple mode) were made in trial to reduce incidental catch and tested in the actual fishing ground. The entanglement rate of the test boats was about 10% lower than that of standard boats, in 1983 tests.

3) Effective range where Dall's porpoise can hear the sound is about 3.0 km for 145 kHz sound generator. Therefore five generators are necessary for 330 tans of gill nets.

4) The reflection loss becomes larger in the order of float, lead line, lead and net.

5) If the ratio of inside and outside diameter is larger than 0.6, increase of reflective wave due to inside air tube of nylon air tube thread is expected.

6) Dall's porpoise's maximum detectable range of gill net was estimated by three different methods. At the relatively calm sea, its range should be calculated on condition that echo-level is equal to the auditory threshold. If the reflection losses of float line, lead line and net are assumed to be 20, 25, and 45 dB, respectively, its ranges are 40, 30 and 11 m, respectively.

7) When Dall's porpoises approach the gill nets, they first know the existence of float line and lead line by their large reflective waves and after further approach, recognize the existence of the net itself. It is believed that they normally escape from getting entangled in the net.

It is necessary to observe the response of Dall's porpoise to the various supersonic pulses and develop more effective sound generator in the future.

水工研報告 6
1985 pp. 289～296

平面網地の流水抵抗に関する研究 III

——貫通式無結節平面網地の抗力係数と縮結量との関係について——

大沢 要一*

目　次

1. 緒　言 …… 289
2. 網地抵抗測定装置 …… 289
2.1 網地抵抗測定装置の本体 …… 289
2.2 網張り枠 …… 289
2.3 網地抵抗測定装置に使用した荷重検出装置 …… 289
3. 実験材料および実験方法 …… 290
3.1 実験材料 …… 290
3.2 実験方法 …… 290
4. 実験結果 …… 292
4.1 平面網地の抗力係数と縮結量との関係 …… 292
4.2 実験結果 …… 294
5. 結　語 …… 295
参考文献 …… 295
Summary …… 296

1. 緒　言

平面網地の抗力係数を推定するに当たり，前稿では平面網地の縮結量を0.293に固定したままで，網地の d/l 値と迎角とを変化させて，これらの因子と平面網地の抗力係数との関係を検討した。一般に使用されている網具では網具を構成している網地の縮結量は0.3前後のものが最も多いが，特殊な網具に使用されている網地の中には縮結量が0.1以下のものから0.5以上に及ぶものまである。したがって，縮結量が0.3前後の網地だけで構成されている網具については前稿で得られた抗力係数の結果を用いて直接，網具に働く抗力を推定することができるが，それ以外の網具では抗力の推定は行なえない。

したがって，今回は前稿の実験結果を用いて平面網地の縮結量が0.293以外の場合の抗力係数を推定できるようにするために実験を行なった。すなわち，本稿においては平面網地の d/l 値を0.106または0.058に固定したままで，網地の縮結量と迎角とを変化させて，これらの因子と平面網地の抗力係数との関係を調べた。そして，実験から得られた任意の縮結量のときの抗力係数の値を縮結量が0.293のときの抗力係数の値で割って，この値を任意の縮結量の場合の抗力係数を推定するために使用する補正係数とした。

一方，平面網地に働く抗力を推定する田内の理論式からも，同様な補正係数を求めて両者の値を比較，検討した。

今回の実験に当たり，色々と有益な御助言・御指導とを賜りました水産工学研究所森　敬四郎先生および下崎吉矩先生に深謝致します。また，今回の実験用網地を御提供下さいました泰東製綱株式会社と実験・論文整理に御協力下さいました水産工学研究所上原亥之助氏，小嶋良子氏，元日本大学水産学科学生辻　賢氏，山崎　誠氏および吉橋雅之氏に謝意を表します。

2. 網地抵抗測定装置

2.1 網地抵抗測定装置の本体[1),2)]

網地抵抗測定装置の本体については第Ⅰ報および第Ⅱ報においてその構造および機能を詳しく説明したので，本稿ではその説明を省略する。

2.2 網張り枠[1),2)]

網張り枠についても第Ⅰ報および第Ⅱ報においてその構造を説明したので，その説明は省略する。

2.3 網地抵抗測定装置に使用した荷重検出装置

網張り枠の中心に掛かる抗力は網地抵抗測定装置にセットされているロードセルにより検出した。

＊ 漁業生産工学部

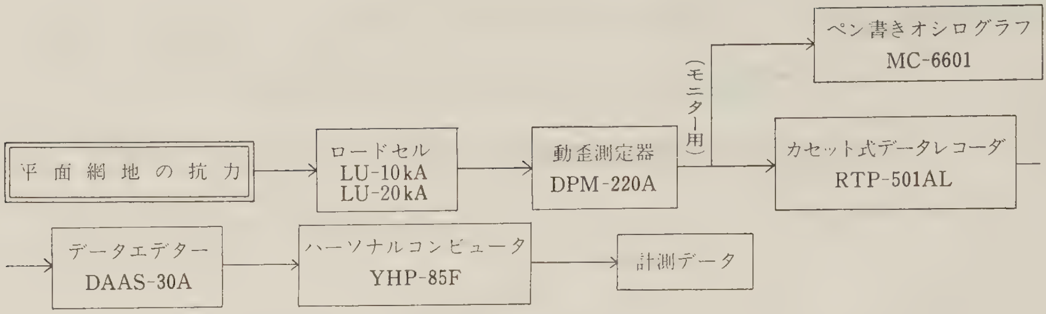


図 1　実験に使用した計測・解析装置のダイヤグラム
Diagram of hydraulic resistance determination system

表 1　実験に使用した網地の明細
Specification of sample nets

網地の規格	網糸の直径（d）	目合（2ℓ）	d/ℓ 値	備考
ポリエチレン製貫通式無結節　60本×45 mm	2.58 mm	48.8 mm	0.106	17.5 mmφ の網張り枠を使用して実験した。
〃　〃　60本×90 mm	2.58 mm	88.8 mm	0.058	12.0 mmφ の網張り枠を使用して実験した。

網張り枠の中心に掛かる抗力の大きさは実験網の種類によって異なるので，2種類のロードセル（10kgw用と20kgw用）を用途に合わせて使用した。ロードセルで検出した荷重は動歪測定器を用いてカセット式データレコーダ内のカセットテープ上に記録された。このテープを研究室に持ち帰り，研究室内に設置されたデータレコーダに掛けて記録を再生し，データエデターを用いて記録のAD変換を行なった。なお，計測値は直接，マイコンのプリンター上に印字するようにした。

図1は今回の実験に使用した計測・解析装置のダイヤグラムを示したものである。

3.　実験材料および実験方法

3.1　実験材料

今回は，ポリエチレン製の貫通式無結節網地のうちから網地の d/l 値が比較的大きいものと普通の大きさのもの2種類を選び実験を行なった。表1は実験網の規格，網糸の直径（d），網地の目合（$2l$），網地の d/l 値などを示したものである。

網糸の直径と網地の目合とを測定するに当っては，まず網地を縮結が1の状態になるように垂下し，その下端に JIS 規格で定められている標準初荷重の 1/2 の重さの重錘を吊り下げた[3)]。このような状態の下で網糸の直径はノギスを用いて測定し，網地の目合はスケールを用いて測定した。また，網地の縮結量を変えれば網張り枠に取り付けられる実験網の大きさも当然変わって来る。表2は縮結量別の実験網の寸法を表示したものである。

3.2　実験方法

水産工学研究所所属の曳航水槽（60m×4m×2m）の台車上に図2のような網地抵抗測定装置本体を設置し，実験網が張り付けてある網張り枠を装置本体の下端の網張り枠取付部に取り付けた。台車を一定方向に一定速度で走らせると，網張り枠の抗力と実験網の抗力との合力が網張り枠の中心に掛かる。この抗力の値は網地抵抗測定装置本体内に組み込まれている抗力測定用のロードセルに掛かる荷重を測定することにより，次のように計算で求めることができる。

いま，流速が V_0，網地の迎角が θ_0 のとき，

T_{D1}：抗力測定用のロードセルに掛かる荷重（kgw）
R_{D1}：網地付きの網張り枠の中心に掛かる抗力（kgw）
x：ジンバル軸の中心から抗力測定用ロードセルの軸の中心までの距離（m）
y：ジンバル軸の中心から網張り枠の中心までの距離（m）

とすれば，R_{D1} は

$$R_{D1}=\frac{T_{D1}\cdot x}{y} \qquad (1)$$

で求めることができる。

表 2 縮結量別の実験網の寸法

Length and depth of each sample net

縮結量	実験網の寸法 （網の長さ×網幅）	目数 （無結節60本×45 mm）	目数 （無結節60本×90 mm）
0.1	1.111m×2.294m	22.5目×47.0目	12.5目×26.0目
0.2	1.250 ×1.667	25.5 ×34.0	14.0 ×19.0
0.293	1.414 ×1.414	29.0 ×29.0	16.0 ×16.0
0.4	1.667 ×1.250	34.0 ×25.5	19.0 ×14.0
0.5	2.000 ×1.154	41.0 ×23.5	22.5 ×13.0
0.6	2.500 ×1.091	51.0 ×22.5	28.0 ×12.5
0.7	3.333 ×1.048	68.5 ×21.5	37.5 ×12.0

次に，網張り枠から実験網を取り除き，網張り枠だけ（以下では空枠と云う。）の抗力を再度測定する。

いま，前述の条件下，即ち流速が V_0，空枠の迎角が θ_0 のとき，

T_{D2}：抗力測定用ロードセルに掛かる荷重（kgw）

R_{D2}：空枠の中心に掛かる抗力（kgw）

とすると，R_{D2} は

$$R_{D2}=\frac{T_{D2}\cdot x}{y} \qquad (2)$$

で計算することができる。

したがって，流速が V_0，網地の迎角が θ_0 のときの平面網地の抗力（R_D）は次式から近似的に求めることができる。

$$R_D \fallingdotseq R_{D1}-R_{D2} \qquad (3)$$

次に，前稿においては，任意の d/l 値と迎角とが与えられた場合の平面網地の抗力を

$$R_D=\frac{1}{2}C_D\rho SV^2 \qquad (4)$$

で表わすことにした。

ただし，

C_D：網地の抗力係数

ρ：水の密度（$\mathrm{kgw\cdot s^2/m^4}$）

S：網地の面積（$\mathrm{m^2}$）

V：流速（m/s）

したがって，網地の抗力係数（C_D）は（4）式を変形して，

$$C_D=\frac{2R_D}{\rho SV^2} \qquad (5)$$

として与えられ，この式から C_D の値は実験データを用いて計算することができる。

なお，今回は実験条件を次のように設定して実験を行った。

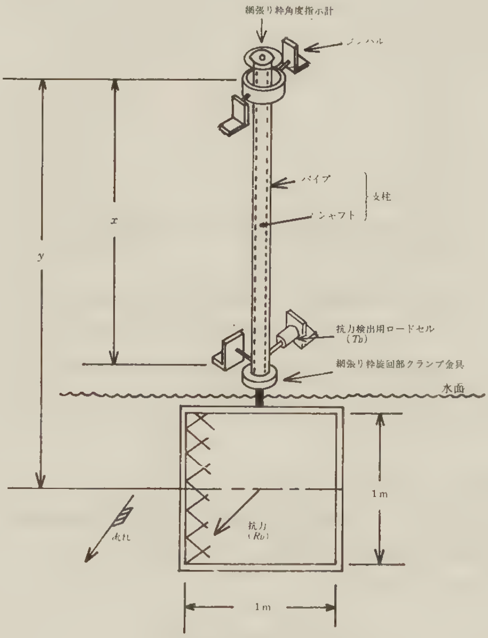


図 2 網地抵抗測定装置

Drawing of apparatus for measurement of hydraulic resistance of plane nets

(1) 縮結量

d/l 値が 0.106 および 0.058 の 2 種類の実験網を用い，縮結量をおのおの 0.1，0.2，0.293，0.4，0.5，0.6 および 0.7 に設定して実験網を網張り枠に張り付けた。

(2) 網地の迎角

各縮結量の実験網に対して，網地の迎角の値をおのおの 90°，80°，70°，60°，50°，45°，40°，30°，20° および 10° に設定し，これら10水準の迎角について実験を行なった。

(3) 実験流速

各実験流速がほぼ 0.5m/s になるように台車の速度を

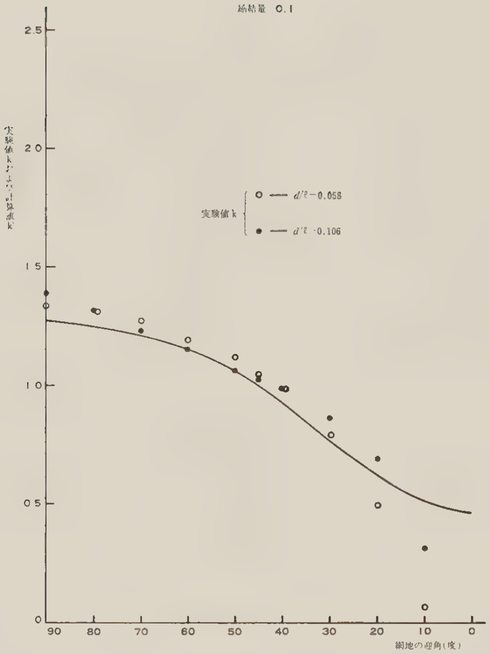


図 3-1　縮結量が 0.1 の場合の迎角と実験値 k および計算値 k′ との関係

Relationships between attack angles of plane nets and values k or k′ keeping hanging ratio in 0.1

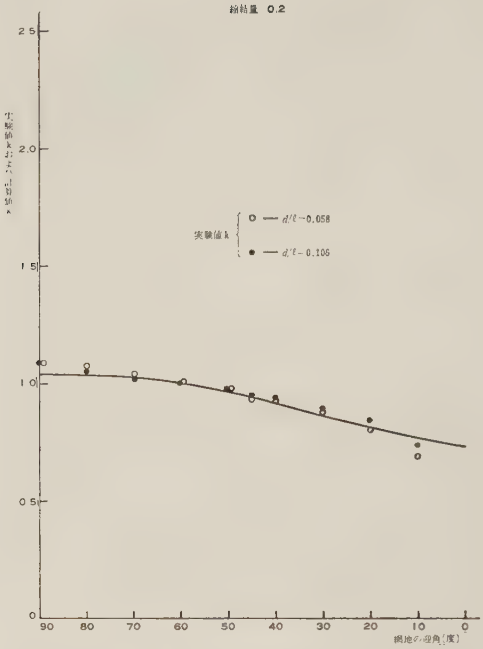


図 3-2　縮結量が 0.2 の場合における迎角と実験値 k および計算値 k′ との関係

Relationships between attack angles of plane nets and values k or k′ keeping hanging ratio in 0.2

調整して実験を行なった。

なお，これら一連の実験は昭和59年1月20日から30日の間に行なわれた。実験期間中の水槽内の水温は0.5～0.6°Cであった。

4.　実験結果

4.1　平面網地の抗力係数と縮結量との関係

前述の（5）式は前稿において筆者等が用いた平面網地の抗力係数を示したものである。一般に（5）式によって定義された抗力係数は網地の d/l 値，網地の迎角の値，網地の縮結量およびレイノルズ数の関数であると考えられる。前稿においては，縮結量を 0.293 に固定しておいて，抗力係数を決定する因子として網地の d/l 値および迎角の二つを選び，これらの因子と抗力係数との関係を調べた。これに対して，本稿においては，網地の d/l 値を0.106または0.058に固定しておいて，抗力係数を決定する因子として網地の縮結量および迎角の二つを選び，これらの因子と抗力係数との関係を実験により調べることにした。

いま，網地の迎角が一定の角度をとる場合，

$(C_D)_H$：縮結量が任意の値 H であるときの平面網地の抗力係数

$(C_D)_{H=0.293}$：縮結量が 0.293 であるときの平面網地の抗力係数

とし，k は任意の縮結量 H のときの 抗力係数 を 縮結量が 0.293 のときの抗力係数で割った値とすれば，

$$k=\frac{(C_D)_H}{(C_D)_{H=0.293}} \tag{6}$$

となる。したがって，この K の値は縮結量 0.293 のときの抗力係数の値を利用して任意の縮結量のときの抗力係数の値を推定するために用いられる補正係数であるとも考えることができる。以下ではこの k の値を**実験値 K** と呼ぶことにする。

田内は網地の d/l 値があまり大きくなく，網地の迎角があまり小さくない場合，単位面積の貫通式無結節網地に働く抗力は次式で与えられるとした[4]。

$$d_\theta=a(d/l)V^2\frac{1-\cos^2\varphi\cos^2\theta}{\sin\varphi\cos\varphi} \tag{7}$$

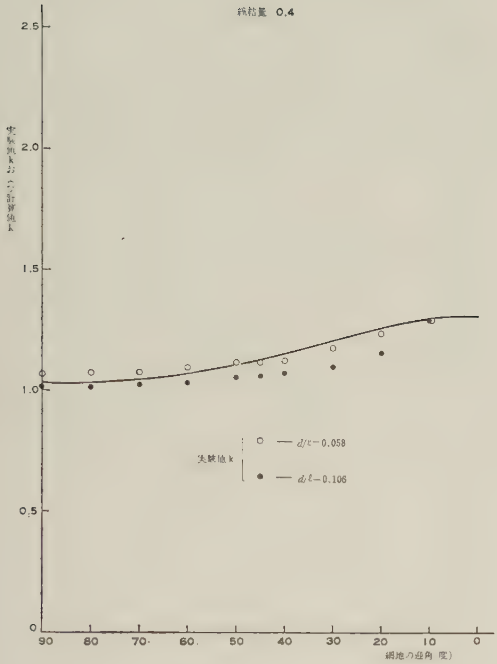


図 3-3　縮結量が0.4の場合における迎角と実験値 k および計算値 k′ との関係

Relationships between attack angles of plane nets and values k or k′ keeping hanging ratio in 0.4

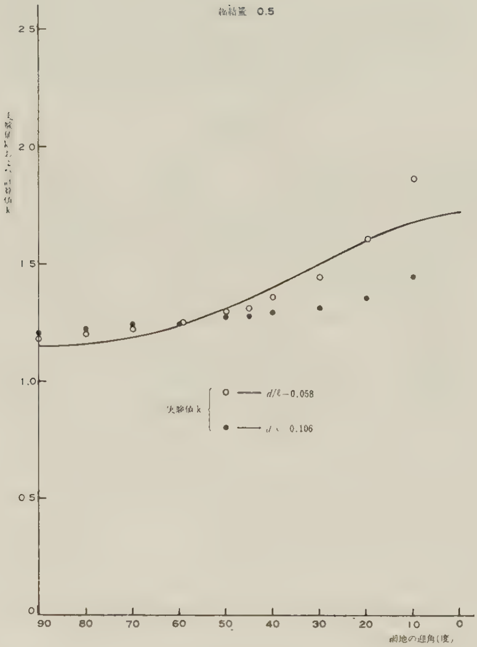


図 3-4　縮結量が0.5の場合における迎角と実験値 k および計算値 k′ との関係

Relationships between attack angles of plane nets and values k or k′ keeping hanging ratio in 0.5

ただし，

d_θ：迎角がθのときに，単位面積当たりの網地に働く抗力

d：網糸の直径

l：脚長

θ：網地の迎角

V：流速

φ：隣り合う2本の脚の交角の1/2の角度

a：定数（レイノルズ数の関数）

である。

一方，縮結量（H）は次式で定義される。

$$H=1-\cos\varphi \qquad (8)$$

いま，網地のd/l値を0.106または0.058に固定し，網地の迎角を一定の値（θ）に設定した場合，

$(d_\theta)_H$：縮結量が任意の値Hであるときの単位面積当りの網地に働く抗力

$(d_\theta)_{H=0.293}$：縮結量が0.293のときの単位面積当たりの網地に働く抗力

とすれば，流速が一定値Vをとるときの実験値kは$(d_\theta)_H/(d_\theta)_{H=0.293}$の値とほぼ等しい値をとるものと考えられる。故に，(7)，(8)式より

$$k \fallingdotseq \frac{(d_\theta)_H}{(d_\theta)_{H=0.293}} = \frac{a(d/l)V^2\dfrac{1-\cos^2\varphi\cos^2\theta}{\sin\varphi\cos\varphi}}{a(d/l)V^2\dfrac{1-\cos^2\frac{\pi}{4}\cos^2\theta}{\sin\frac{\pi}{4}\quad\cos\frac{\pi}{4}}}$$

$$=\frac{1-(1-H)^2\cos^2\theta}{(2-\cos^2\theta)(1-H)\sqrt{2H-H^2}} \qquad (9)$$

となるはずである。したがって，(9)式における最後の式は田内の理論式から導かれた任意の縮結量および迎角の場合の抵抗係数を推定するための補正係数を示したものであると考えることができる。この値をk'とすれば

$$k'=\frac{1-(1-H)^2\cos^2\theta}{(2-\cos^2\theta)(1-H)\sqrt{2H-H^2}} \qquad (10)$$

となる。k'は縮結量Hと網地の迎角θとの関数であるので，(10)式に任意のHとθとの値を与えればk'の値を計算で求めることができる。以下においてはこのk'の値を**計算値k'**と呼ぶことにする。

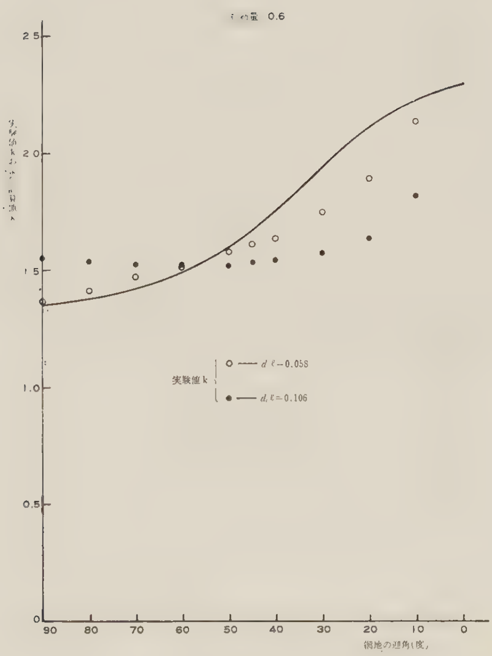


図 3-5　縮結量が 0.6 の場合における迎角と実験値 k および計算値 k′ との関係

Relationships between attack angles of plane nets and values k or k′ keeping hanging ratio in 0.6

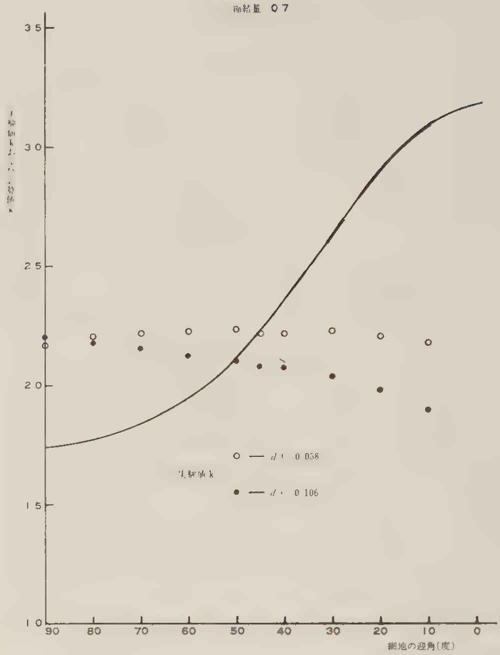


図 3-6　縮結量が 0.7 の場合における迎角と実験値 k および計算値 k′ との関係

Relationships between attack angles of plane nets and values k or k′ keeping hanging ratio in 0.7

4.2　実験結果

図 3-1 ～図 3-6 は 2 種類の貫通式無結節平面網地について，各縮結量毎に網地の迎角（θ）とそれに対応する実験値 k および計算値 k' との関係を示したものである。実験値 k は(6)式によって定義されたものであり，計算値 k' は(10)式によって与えられたものである。これら 6 枚の図は縮結量が0.1，0.2，0.4，0.5，0.6，0.7 の場合の網地の迎角に対応する実験値 k および計算値 k' の値を示したものである。

図から次のことが分かるであろう。

(1)　縮結量が 0.1，0.2，0.4 の範囲では各迎角に対応する実験値 k および計算値 k' の値はほぼ良く一致している。また縮結量が 0.5 の場合も迎角が 30° 以下のときを除いては各迎角に対応する実験値 k および計算値 k' の値はほぼ良く一致している。したがって，これらの場合は任意の縮結量の抗力係数の補正係数は(10)式から計算される計算値 k' を使って差し支えない。

(2)　縮結量が0.6，0.7と大きくなるにしたがって，各迎角に対応する実験値 k と計算値 k' との値は次第に乖離してくる。したがって，これらの場合は実験値 k の値を用いて，任意の縮結量の抗力係数を推定したほうが妥当であると考えられる。一般に計算値 k' を算定する場合に用いた田内の式は網目を通過する流れは定常流であると仮定した上で算定されたものである。しかしながら，網地を縮結量が0.6，0.7の状態で網張り枠に張ってみると，実験網の網糸は密な状態になり，互いに隣接する網脚はほぼ密着した状態となる。したがって流れが網目を通過するときに流れが互いに干渉を起こす結果，実験値 k と計算値 k' との乖離が起こるのではないかと考えられる。

(3)　単位面積当たりの網地の使用量は縮結量が 0.293 のときが最小となり，縮結量が0.2，0.1と次第に減少するにしたがいその使用量は逆に増大して行くことが知られている。しかしながら，網地の迎角が約 45° 以下のときに限って云えば縮結量が0.2，0.1と次第に減少するにしたがって，実験値 k および計算値 k' の値はともに 1 以下の値をとりながら予想に反して次第に減少する傾向に

あることが判明した。

5. 結　語

前稿では網地の縮結量を0.293に固定した場合の平面網地の抗力係数（$(C_D)_{H=0.293}$）を求めた。本稿では縮結量を0.293以外の値に変えた場合の平面網地の抗力係数の推定法について研究を行なった。

一般に縮結量が0.1から0.5の範囲内では（6）式により定義された実験値 k と(10)式で与えられた計算値 k' とはほぼ良く一致する。したがって縮結がこの範囲の値をとる場合は任意の縮結量（H）が決まれば，任意の迎角（θ）における抗力係数（$(C_D)_H$）は，(10)式から計算される k' を用いて

$$(C_D)_H=k'\times(C_D)_{H=0/293}$$

で近似的に推定することができる。

しかしながら，縮結量が0.6，0.7と増大するにしたがって，実験値 k と計算値 k' との値は次第に乖離するので，上記のような推定は行なえない。

参考文献

1）大沢要一・田原陽三・森　敬四郎：平面網地の流水抵抗に関する研究　II，水工研報告，4，1983

2）大沢要一・森　敬四郎・田原陽三：平面網地の流水抵抗に関する研究　I，水工研報告，3，1982

3）日本工業規格：合成繊維漁網試験方法，1973

4）M. Tauchi: The Force acting on Plane Net in Motion through the Water, Bull. Japan Soc. Sci. Fish., Vol. 3, No. 4, 1934

Studies on Resistance of Plane Net against Flow of Water

—Relationship between Drag Coefficients and Hanging Ratios of Plane Nets—

By

Yoichi OSAWA

Summary

In the previous experiment, values of drag coefficients of plane nets hanged in 0.293 were obtained. Here the author reports on the results of examinations carried out following the previous experiment. Studies were made on the difference in drag coefficients of sample nets with various hanging ratios.

The resultant theoretical formulae is as follows:

$$\frac{(C_D)_H}{(C_D)_{H=0.293}}=\frac{1-(1-H)^2\cos^2\theta}{(2-\cos^2\theta)(1-H)\sqrt{2H-H^2}},$$

Where

$(C_D)_H$; Drag coefficient where the value of hanging ratio is H

$(C_D)_{H=0.293}$; Drag coefficient where the value of hanging ratio is 0.293

θ; Attack angle of a net

H; Value of hanging ratio

The values of $(C_D)_H/(C_D)_{H=0.293}$ obtained from the experiments agreed considerably well with values from the above theoretical formulae, within the rang from 0.1 to 0.5 of hanging ratio.

水工研報告 6
1985 pp. 297～321

養殖生簀網の研究 II

——生簀網の容積と流速との関係について——

大沢要一*・田原陽三*・武富　一*

目　次

1. 緒　　言 …… 297
2. 模型法則，模型網および実物網 …… 298
  2.1 模型法則 …… 298
  2.2 模型網 …… 298
  2.3 実物網 …… 299
3. 実験装置，実験方法および実験条件 …… 301
  3.1 実験装置 …… 301
  3.2 実験方法 …… 301
  3.3 実験条件 …… 302
4. 実験結果 …… 303
  4.1 生簀網の容積と流速との関係 …… 303
  4.2 生簀網の断面形状 …… 305
5. 結　　語 …… 305
  参考文献 …… 305
  付　　図 …… 306
  Summary …… 321

1. 緒　　言

従来，わが国の鹹水養殖業はおもに内湾域で営まれて来た。これは内湾域は潮流が弱く，波浪が穏やかであるばかりでなく，陸地からも比較的近距離に位置しており，その環境および立地条件が恵まれているためである。近年，各地において養殖業が盛んになるにつれて，養殖の適地は不足気味となり，内湾域では養殖施設が過密な状態で敷設されるようになって来た。その結果，漁場の荒廃が進み，養殖魚の成長率が低下するばかりか，時には魚病や赤潮が発生して，大量の養殖魚が死亡する例も起こっている。

しかしながら，これら内湾域の外縁部には水深30～100mの広範な沖合域が未利用のまま放置されている。これは沖合域は潮流が強く，波浪が高いので，これらの海況条件に適合した養殖施設を新たに開発しなければならないことや，陸地からやや遠いと云う地理的条件の悪さによるものと思われる。

この沖合域を新たに養殖場として利用するため，水産庁は「沖合漁業利用養殖技術開発企業化試験」を三個所の地方水産試験場に委託し，沖合養殖のための実用化試験を行った。高知県水産試験場は昭和51年度から暖流系魚類（主としてクロマグロ養殖）について，石川県水産試験場は昭和52年から日本海型魚類（主としてマダイ，イシダイ，フクラギの蓄養）を，岩手県水産試験場は昭和54年度から北日本型魚類（主としてギンザケ養殖とクロマグロ蓄養）について，それぞれ研究を開始した1)2)3)。

これらの沖合養殖に関する研究の過程で，沖合養殖施設の設計に関するノウハウも次第に蓄積されて来たが，特に次の二つの事項の解明が急がれている。

(1) 生簀網が流れと波浪から受ける流体力を算定する問題，

(2) 生簀網に使用されている吹かれ防止策の効果に対する評価および生簀網の容量と流速との関係

筆者等は前稿において，(1)のうちの生簀網が流れから受ける流体力の算定方法に関して，一つの試案を報告した。本稿では吹かれ防止策（中吊用重錘方式と大型沈子方式）を施した生簀網について，流速と生簀網の容積との関係を検討するとともに，これらの吹かれ防止策の効果の評価についても併せて検討することにする。

今回の実験に当たり，色々と有益な御助言と御指導を賜りました水産工学研究所森　敬四郎先生，下崎吉矩先生，三次信輔先生および東海区水産研究所小長谷史郎先生に深謝致します。また今回の実験用網地を御提供下さいました函館製網船具株式会社，回流水槽の使用に当たり多くの御便宜を賜りました漁船工学部の川島敏彦氏および実験・論文整理に御協力下さいました水産工学研究所上原亥之助氏，小嶋良子氏，元日本大学水産学科学生

---

* 漁業生産工学部

浜村一夫氏，辻賢氏，山崎　誠氏および吉橋雅之氏に謝意を表します。

2.　模型法則，模型網および実物網

2.1　模型法則[4)]

模型網の製作に当っては，その寸法を0.5m×0.5m×0.5mとした。したがって，模型法則により拡大された実物網の寸法は10m×10m×10mのものを想定した。模型法則を表わす下記の式において，実物網の値は単なる欧文字で，また，模型網の値はダッシュが付いた欧文字で表示することにした。今回の実験では模型法則の値を下記のごとく決めた。

(1)　模型網と実物網の長さ（λ）の寸法比（縮尺比）

$$\frac{\lambda'}{\lambda}=\frac{0.5}{10}=0.05$$

(2)　網糸の太さ（D）および目合（L）の寸法比

$$\frac{D'}{D}=\frac{L'}{L}=\frac{1}{4}$$

(3)　流速（V）比（ただしρは網糸の比重を示す。）

$$\frac{V'}{V}=\sqrt{\frac{D'}{D}\cdot\frac{\rho'-1}{\rho-1}}=\sqrt{\frac{1}{4}}=0.5$$

(4)　網具の決まった点に働く力（F）の比

$$\frac{F'}{F}=\left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)\cdot\left(\frac{V'}{V}\right)^2=\left(\frac{1}{20}\right)^2\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^2=6.25\times10^{-4}$$

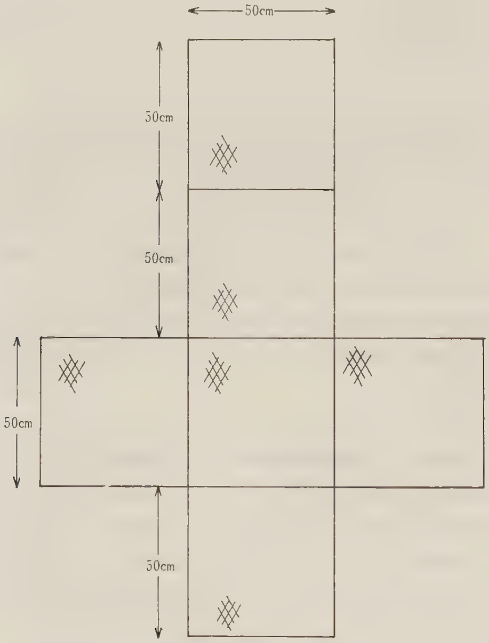


図 1　生簀模型の設計図面

A designe drawing of model fish cage

2.2　模型網

(A)　網　　地

実験にはそれぞれ一辺の長さが0.5mの3種類の立方体生簀模型を用いた。これら3種類の生簀模型は網地のd/ℓ値がおのおの異なる単一のナイロン製蛙又結節網地で構成されている。即ち，A網は210D/9本×25節の網地で，B網は210D/4本×25節の網地により，C網は210D/2本×25節の網地で構成されている。図1はこれら3種類の生簀模型の設計図面を示したものである。また，表1はこれら3種類の生簀模型に使用した網地の明細表である。これら3種類の生簀模型の縮結量はいずれも0.293とした。

(B)　筋　　網

筋網については第I報において説明したので，本稿ではその説明を省略する。

(C)　中吊用重錘および大型沈子

生簀網に急潮流が当たると生簀網はその容積を減少させる。したがって，この容積の急激な減少は生簀内の養殖魚に悪影響を及ぼすので，現実の生簀網では急激な容積の減少を防止するために**吹かれ防止策**が構じられているのが普通である。今回の実験では吹かれ防止策として次の二つの方法を採用した。

(1)　中吊用重錘を用いる方法

中吊用重錘が取り付けられた中吊網を4個ある台浮子と生簀網の底網の四隅との間にそれぞれ1本ずつ吊り下げて，生簀網の吹かれを防止する方法である。

(2)　大型沈子を用いる方法

12個程度の大型沈子を，生簀網の底網の筋網の部分に等間隔に吊り下げて，生簀網の吹かれを防止する方法で

表 1　3種類の生簀模型に使用した網地の明細

Specifications of nettings used for model nets

生簀模型	材質	結節の種類	網糸の直径(d)および目合(2ℓ)	網糸の直径(d)の実測値	目合(2ℓ)の実測値	d/ℓ値
A網	ナイロン	蛙又結節	210D/9本×25節	0.73mm	11.7mm	1.25×10^{-1}
B網	ナイロン	〃	210D/4本×25節	0.52	11.1	9.37×10^{-2}
C網	ナイロン	〃	210D/2本×25節	0.36	12.7	5.67×10^{-2}

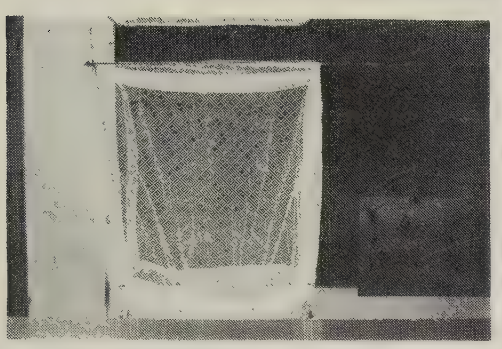


図 2-1 静水中における生簀模型の形状
Net shape of a model net in still water

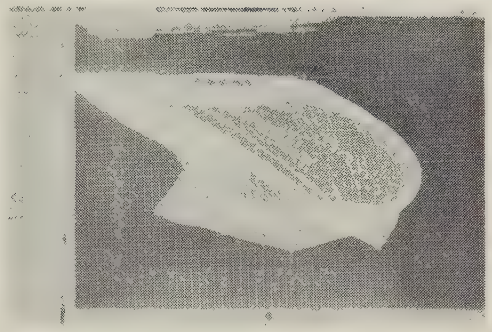


図 2-2 流水中における生簀模型の形状
Net shape of a model net in uniform flow

表 2 実験に使用した中吊用重錘と大型沈子の明細表
Specifications of sinkers used for model nets

実験条件	沈子の種類	沈子1個当たりの空中重量	使用個数
X－3	中吊用重錘	8.85 grw	4 個
X－9	〃	29.61	〃
X－12	〃	40.21	〃
X－15	〃	51.64	〃
X－21	〃	79.15	〃
Y－1	大型沈子	4.33 grw	12 個
Y－3	〃	8.85	〃
Y－4	〃	12.85	〃
Y－5	〃	16.76	〃
Y－7	〃	22.09	〃

ある。

表2は生簀模型に使用された中吊用重錘と大型沈子の規格を示す明細表である。また図2は回流水槽の観測部内にセットされた実験中の生簀模型の写真を示したものである。

2.3 実物網

2.2 で述べた生簀模型の仕様は模型法則により実物網の仕様に拡大することができる。表3は模型実験の対象となった実物網の仕様を示したものである。一般に沖合養殖に使用されることが予想される標準的な生簀網の仕様はB網である。A網は網地の目づまりの程度（*d*/*ℓ* 値）が標準の生簀網の仕様より大きくなっており，C網は反対に目づまりの程度が小さくなっている。

表 3 実物網（10m×10m×10m）の仕様
Specifications of full scale fish cage

実物網の規格			A網	B網	C網	網地 1 m² 当たりの沈降力
網地の材質			ナイロン	ナイロン	ナイロン	
網地の結節の種類			蛙又結節	蛙又結節	蛙又結節	
網糸の直径（*d*）			2.92 mm	2.08 mm	1.44 mm	
目合（2*ℓ*）			46.8 mm	44.4 mm	50.8 mm	
d/*ℓ* 値			1.25×10^{-1}	9.37×10^{-2}	5.67×10^{-2}	
総沈降力	中吊用重錘方式	X－3	12.9 kgw× 4個	12.9 kgw× 4個	12.9 kgw× 4個	0.09 kgw/m²
		X－9	43.2 × 4	43.2 × 4	43.2 × 4	0.29
		X－12	58.7 × 4	58.7 × 4	58.7 × 4	0.39
		X－15	75.3 × 4	75.3 × 4	75.3 × 4	0.50
		X－21	115.5 × 4	115.5 × 4	115.5 × 4	0.77
	大型沈子方式	Y－1	6.3 kgw×12個	6.3 kgw×12個	6.3 kgw×12個	0.13 kgw/m²
		Y－3	12.9 ×12	12.9 ×12	12.9 ×12	0.26
		Y－4	18.7 ×12	18.7 ×12	18.7 ×12	0.38
		Y－5	24.5 ×12	24.5 ×12	24.5 ×12	0.49
		Y－7	32.2 ×12	32.2 ×12	32.2 ×12	0.65

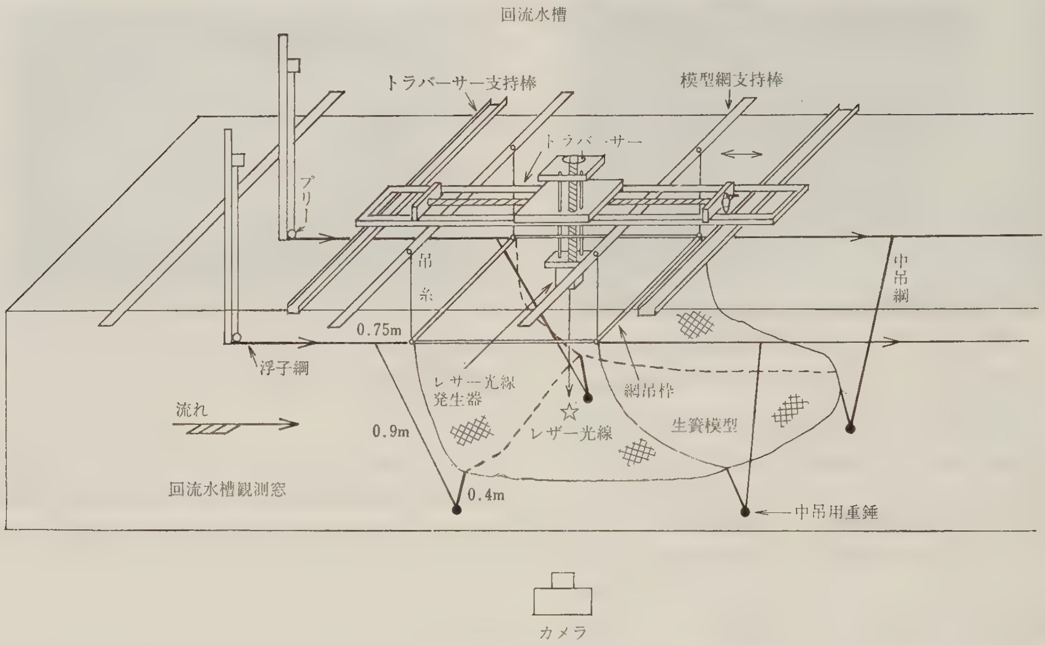

回流水槽
トラバーサー支持棒
模型網支持棒
トラバーサー
プリー
吊糸
中吊綱
0.75m
浮子綱
レザー光線発生器
網吊枠
流れ
レザー光線
生簀模型
0.9m
0.4m
回流水槽観測窓
中吊用重錘
カメラ

図 3-1 中吊用重錘方式を用いた実験装置
Experiment layout drawing (1)

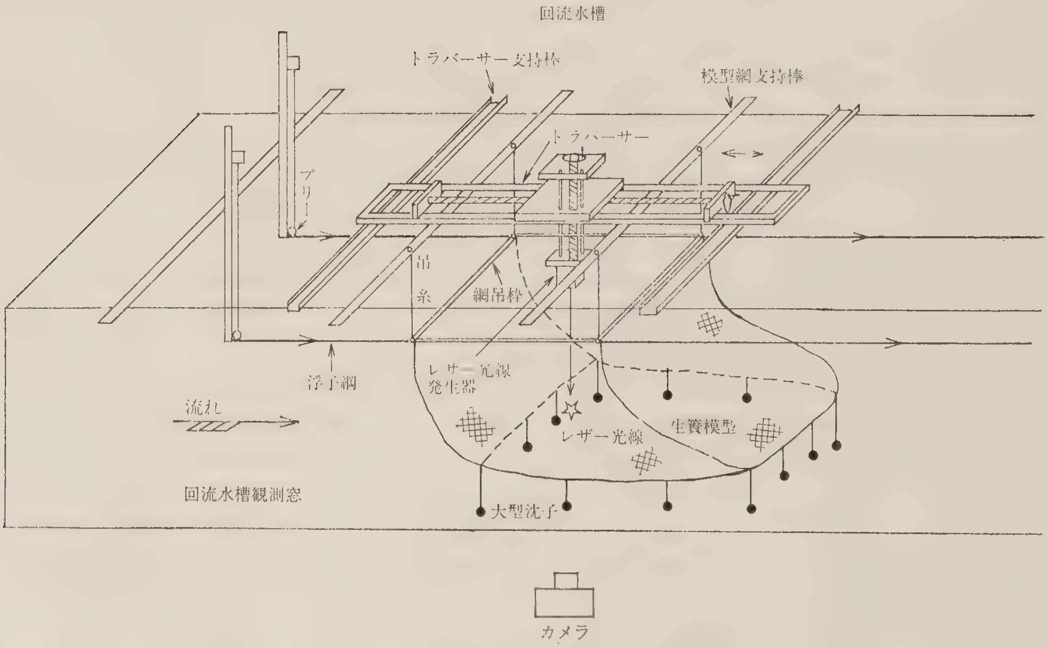

回流水槽
トラバーサー支持棒
模型網支持棒
トラバーサー
プリー
吊糸
網吊枠
浮子綱
レザー光線発生器
流れ
レザー光線
生簀模型
回流水槽観測窓
大型沈子
カメラ

図 3-2 大型沈子方式を用いた実験装置
Experiment layout drawing (2)

3.　実験装置，実験方法および実験条件

3.1　実験装置

2.2 で述べた生簀模型を水産工学研究所所属の回流水槽の観測部（3.4m×1.2m×0.8m）内にセットして，これに流れを当てて，生簀模型の網成りをカメラで撮影した。図 3-1 は生簀網の吹かれ防止策に中吊用重錘を用いた場合の実験装置を示したものであり，図 3-2 は大型沈子を用いた場合の実験装置を示したものである。

実験に当っては生簀模型の上網の筋綱を網吊枠（0.5m×0.5m）に糸でかがり付ける。そして，生簀模型の上網が水面下 5 cmの位置になるように，模型網支持棒から吊糸を介して，生簀模型を吊り下げた。潮上側の浮子綱はプリーを介してフックに固定し，潮下側の浮子綱も同様に潮下側のフックに固定された。浮子綱には伸びの少ないトワイン（スーパートド，ϕ 1.5 mm）が使用された。回流水槽観測部の上部に，図 4 のように観測窓の壁に直角にトライバーサー支持棒を 2 本置き，その上にトラバーサーを設置した。トラバーサーの下端には図 5 のようにガスレーザー（東芝製 LAG-3211）が取り付けられた。また，トラバーサーを観測窓に対して前後の方向へ平行に移動する際には人力によりそれを移動した。また，潮上側から潮下側へ流れに平行にガスレーザを移動させる際にはトラバーサーのハンドルを廻してそれを移動させた。

3.2　実験方法

生簀模型を回流水槽の観測部内にセットし，これに一定の流れを当てると，生簀模型は吹かれたのちに一定の安定した網成を保つ。この時の生簀網の容積は次のような方法で近似的に測定できる。まず，回流水槽実験棟の窓を暗幕で覆って，室内を暗闇にする。そして，カメラのシャッタースピードを開放の状態にして，観測部の前面から生簀模型に向けてカメラをセットする。

生簀模型の上に設置されたガスレーザを点灯し，レーザ光線を発生させると，レーザ光線は水中に入って網糸に当たり，赤く発光する。したがって，トラバーサーを使ってガスレーザを生簀模型の潮上側から潮下側へ流れに平行に移動させると，図 6 のような一枚の生簀模型の断面写真を撮ることができる。この図からも明らかなように，生簀網の断面はいずれも一筆書きの線で形成されていることが分かる。

図 7 に示すように，1 個の生簀模型においては観測窓側の生簀模型の側網より 5 cmの地点から始まって45cmの地点まで均等に 5 cm おきに合計 9 枚の断面写真を撮影した。ここでは，生簀模型の各断面の名称を手前から $S(1)$，$S(2)$……$S(9)$ と呼ぶことにする。なお，生簀模型の両サイドの側網の部分は網地が前後に入り組んで複雑な形状をしているために，その断面写真は撮らなかった。これはこれらの断面積を写真から計算するに当たり，その断面をハサミで切り取ることが困難であると判断したためである。

また，生簀模型の断面写真からその面積を計算するに当っては次のような方法を採った。まず写真から生簀模型の断面部分をハサミで切り取り，その重量を化学天秤（メトラー社製　秤量：120 grw，感量：0.1 mg）で測

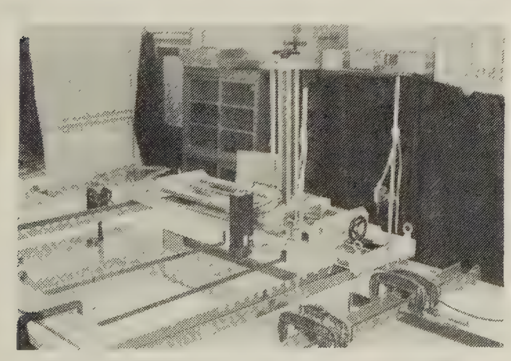


図 4　実験に使用したトラバーサーの全景

Panoramic photography of traverse used for the experiment

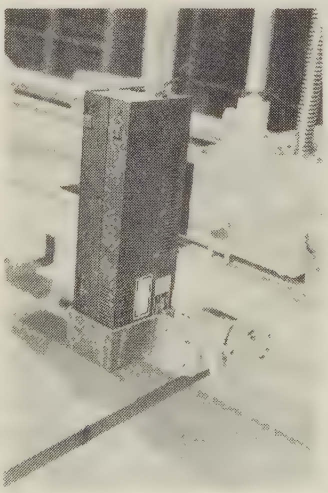


図 5　トラバーサーに取り付けられたガスレーザの全景

Panoramic photography of gass laser fitted with traverse

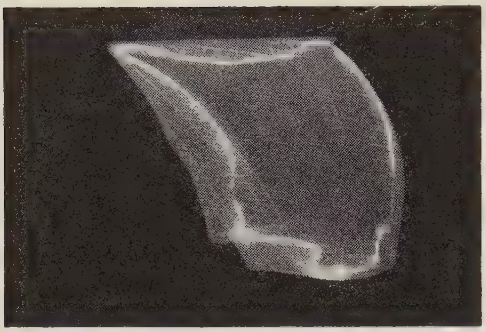


図 6　生簀模型の断面形状写真の 1 例

A photographic illustration of a cross section of a model net

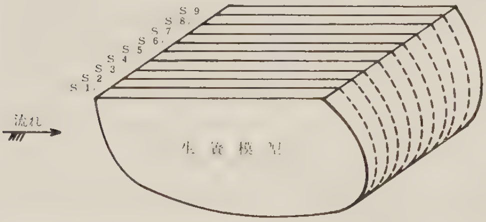


図 7　生簀模型の断面形状撮影位置
（断面間の距離は 5 cm）

A photographic illustration of a cross section of a model net where the sectional photography were taken

定した。また基準物体として50 cm × 50 cm の正方形の物体を生簀模型が設置されていた中央の位置（$S(5)$の位置）に置き，その写真の面積の重量を同様に化学天秤で測定した。

いま

生簀模型の断面写真の重量を　W_m
基準物体の断面写真の重量を　W_s
生簀模型の断面積を　A_m

とすれば，

$$A_m=\frac{W_m}{W_s}\times 50\times 50\ (\mathrm{cm}^2) \qquad (1)$$

として，生簀模型の断面積を近似的に，推定できる。したがって（1）式を用いて生簀模型の各断面の面積を計算すれば，次式により生簀模型の容積を近似的に計算することができる。

いま，相隣り合う断面積間の距離を d　（$d=5$ cm）
各断面の面積を $S(I)$　（但し，$I=1\sim 9$）
生簀模型の容積を V　（cm^3）

とすれば

$$V\doteqdot d\{S(1)+S(2)+S(3)+S(4)+2S(5)+S(6)+S(7)+S(8)+S(9)\} \qquad (2)$$

となる。（2）式を用いて計算される V の値は式が不完全なために，ある程度の誤差を含むことはやむを得ない。なお，これらの生簀模型は縮尺比が 1/20 であるので，（2）式で計算された生簀模型の容積を20×20×20倍すれば実物の生簀網の容積を計算することができる。以下では，生簀網の容積を実物網換算値で表示することにする。

なお，生簀模型の断面をカメラで撮影するに当ってはレンズの遠近感効果（perspective effect）のために，同じ面積の断面でもレンズからの距離の遠近により，異なる面積として写真に撮ることが知られている。しかしながら，生簀網の容積を積算する際の遠近感効果により生ずる誤差は基準物体を生簀模型がセットしてあった中央の位置（$S(5)$の位置）に置くことにより除去できるものと考えられる。

3.3　実験条件

今回は実験条件を下記のごとく設定して，流れによって起こる生簀模型の容積変化を測定した。

(1)　生簀模型

2.2 で述べたごとく，一辺の長さが 0.5 m の 3 種類の立方体の生簀模型を実験に使用した。

(2)　実験流速

静水中および 4 段階の流速中で，生簀模型の断面を測定した。表 4 は模型網および実物網の実験流速を示したものである。なお，実験は浮子網に平行な一方向の流れについて行なわれた。

(3)　生簀模型の吹かれ防止策の種類

2.2 で述べたごとく，各生簀模型について，中吊用重錘方式と大型沈子方式とを採用した。実験に使用した中吊用重錘と大型沈子の規格の明細については 2.2 に掲げた表 2 を参照されたい。

なお，この実験は 1982 年11月18日～12月30日および

表 4　模型網と実物網の流速

Tank current velocity corresponding to the field current

流速段階	模型網の流速	実物網の流速
1	0　m/s	0　m/s
2	0.134	0.267
3	0.171	0.341
4	0.207	0.414
5	0.244	0.488

1984年2月21日～3月2日の2回に亘って行なわれたものである。

4.　実験結果

4.1　生簀網の容積と流速との関係

図3-1および3-2に示すような実験装置を使って，静水中および各流速中における生簀模型の断面形状写真を撮影した。これらの一連の断面写真から，3.2で述べた方法により生簀網の容積を計算した。

図8-1～8-6は生簀網の容積と流速の関係を図示したものである。生簀網の設計図から計算される静水中における生簀網の容積は10m×10m×10m＝1,000m^3となるが，現実の静水中における生簀網の形状は必ずしも立方体の形をしておらず，始めから1,000m^3より小さい容積しか占めていない。次に，生簀網に流れが当たると，生簀網の網地は後方に吹かれ，流速が速くなるにしたがい，生簀網の容積は次第に減少する。

図から次のことが分かる。

(1)　一定の吹かれ止めの方法と生簀網の種類とを採用した場合は，吹かれ止めに使用する沈子量を増大する程，生簀網の容積は増大する。その増大する割合は図8-1～図8-6に示すとおりである。したがって，各流速における生簀網容積を増大させるためには，沈子量または重錘量を増すことが最も確実な方法であると云えよう。

(2)　一定の吹かれ止めの方法を採用し，一定量の沈子量を使用した場合は，生簀網の容積は生簀網に使用する網地の種類により決まるようである。

即ち，沈子量が網地1m^2当たり0.1kgw程度と小さい時は，d/ℓ値が小さい網地で製作された生簀網よりd/ℓ値の大きい網地で作られた生簀網のほうが生簀網の容積は大きくなる傾向がある。また，沈子量が網地1m^2当たり約0.26kgw以上になると，逆にd/ℓ値の最も小さい網地で製作されたC網はd/ℓ値の大きいA網およびB網に比べて，生簀網の容積は大きくなる傾向がある。特に沈子量が0.7kgw/m^2前後の時は，生簀網の容積はC網＞B網＞A網の順となっている。

(3)　一定の生簀網の種類を採用し，一定量の沈子量を使用した場合は，ある特定の流速を境にして，それより低流速域では大型沈子方式を採用した生簀網のほうが中吊用重錘方式を採用した生簀網より生簀網の容積は大きくなる。一方，それよりも高流速域では反対に中吊用重錘方式を採用した生簀網のほうが大型沈子方式を採用した生簀網よりその容積は大きくなる傾向が見られる。

したがって，生簀網の容積を増大する見地から見れ

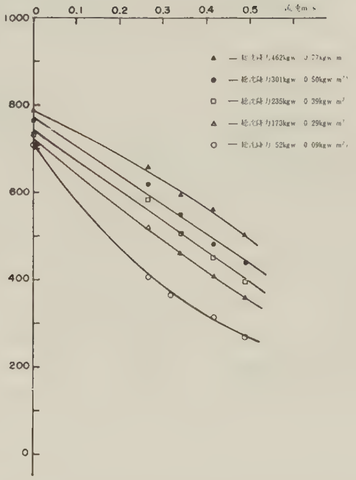


図 8-1　中吊用重錘方式を採用したA網における生簀網の容積と流速との関係

Relationship between estimated volume of full scale fish cage and various field current velocity where A type model net have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow

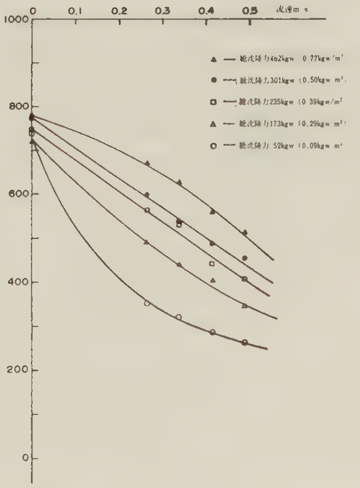


図 8-2　中吊用重錘方式を採用したB網における生簀網の容積と流速との関係

Relationship between estimated volume of full scale fish cage and various field current velocity where B type model net have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow

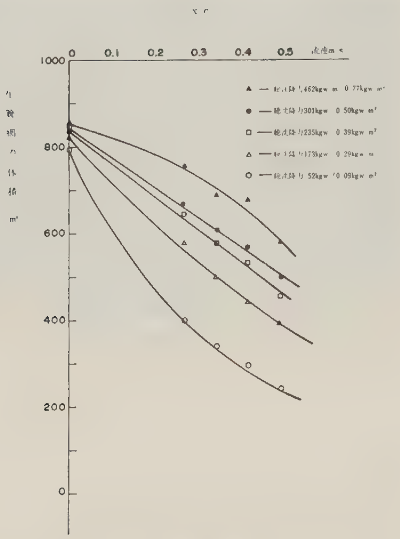


図 8-3　中吊用重錘方式を採用したC網における生簀網の容積と流速との関係

Relationship between estimated volume of full scale fish cage and various field current velocity where C type model net have the sinker device shown in fig. 3-1 as a countermeasure against ffow

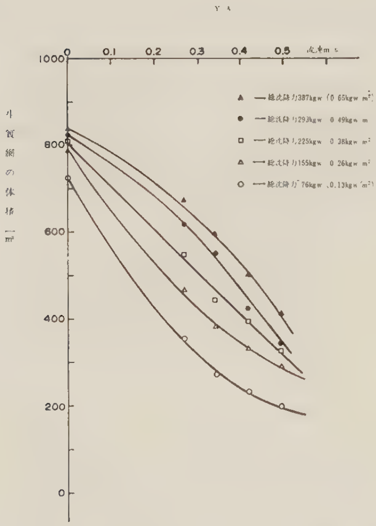


図 8-4　大型沈子方式を採用したA網における生簀網の容積と流速との関係

Relationship between estimated volume of full scale fish cage and various field current velocity where A type model net have the sinker device shown in fig. 3-2 as a countermeasure against flow

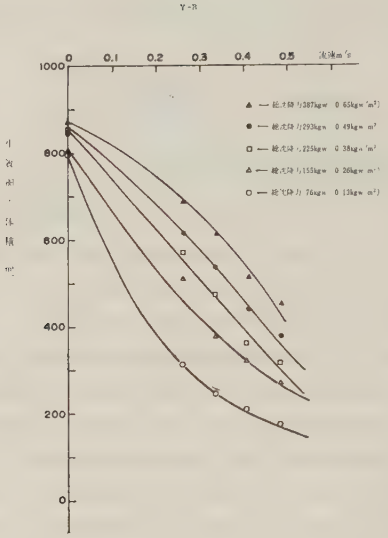


図 8-5　大型沈子方式を採用したB網における生簀網容積と流速との関係

Relationship between estimated volume of full scale ffsh cage and various field current velocity where B type model net have the sinker device shown in fig. 3-2 as a countermeasure against flow

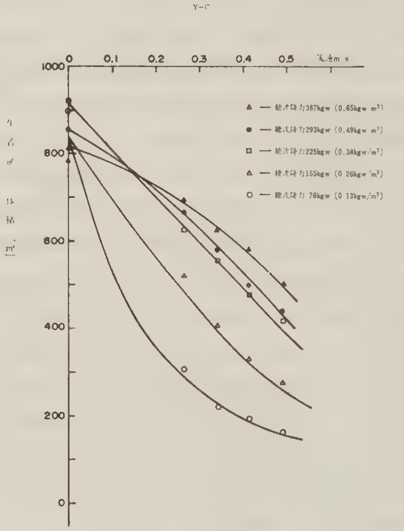


図 8-6　大型沈子方式を採用したC網における生簀網容積と流速との関係

Relationship between estimated volume of full scale fish cage and various field current velocity where C type model net have the sinker device shown in fig. 3-2 as a countermeasure against flow

ば，一般に流速の低い海域に設置する生簀網では大型沈子方式を採用したほうが有利であるが，流速の高い海域に設置する生簀網では逆に，中吊用重錘方式を用いたほうが望ましいと考えられる。

なお，実験精度があまり高くないため，上記の限界流速の値には一定の傾向は見られなかった。

4.2　生簀網の断面形状

付図１および２は中吊用重錘方式または大型沈子方式を採用したＡ網，Ｂ網およびＣ網において，その沈子の総沈降力を230kgw 前後にした場合の生簀網の断面形状を示したものである。この総沈降力の値は将来，沖合養殖網において使用されることが予想される値である。付図において，生簀網の断面形状がS（５）の位置を中心にして，その前後の対象な位置にある断面の面積は必ずしも同じ大きさでない。これはレンズの遠近感効果のためである。

付図１および２に示された各流速における断面形状と実験中の観察から，次のことが明らかになった。

⑴　中吊用重錘方式を採用した生簀網は大型沈子方式の生簀網に比べて，その網丈は一般に低いが，網成りは良好であると思われる。また，中吊用重錘の位置から生簀網の底網の位置までの中吊綱の働きについて，次のことが観察された。

一般に，流れが速いときはこの部分の中吊綱は中吊用重錘の位置から平行に生簀網の潮上側の底網の隅みの部分を水平に保持する働きをしている。したがって，この部分の長さを必要以上に長くすることは生簀網の下部を必要以上に後方へ移動させて，生簀網の網成りに悪い影響を与えるものと考えられる。

⑵　大型沈子方式を採用した生簀網は中吊用重錘方式の生簀網に比べて，その網丈は高いが，流速の速い領域では生簀網全体が後方に吹かれるために網成りは悪くなる傾向が見られる。

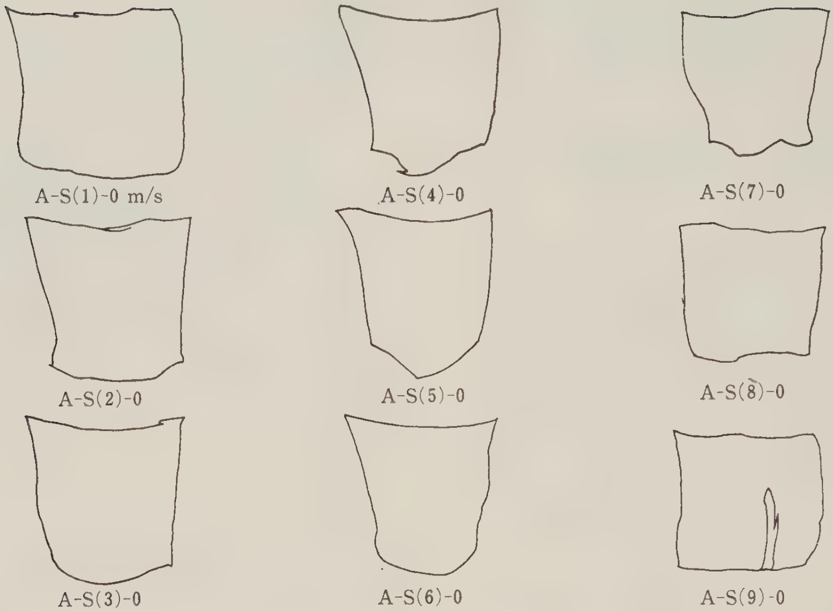
5.　結　語

レーザ光線を利用して撮影した生簀模型の断面形状写真から，静水中および流水中における生簀網の容積を推定した。その結果，各流速における生簀網容積を増大させるためには，沈子量を増すことが最も確実な方法であることが分った。また，生簀網の容積増大の観点から見れば流れが遅い海域に使用する生簀網では吹かれ止めに大型沈子方式を採用した方が有利であるが，逆に流れの速い海域に使用する生簀網では中吊用重錘方式を採用する方が望ましいと云える。両者の限界流速については図８を参照されたい。

一般的に云って，この実験が対象とする規模の沖合養殖網に使用される標準的な中吊用重錘および大型沈子の総沈降力は230kgw 程度のものが最も普通であると考えられている。付図１および２はこの場合の生簀網の断面形状を示したものである。

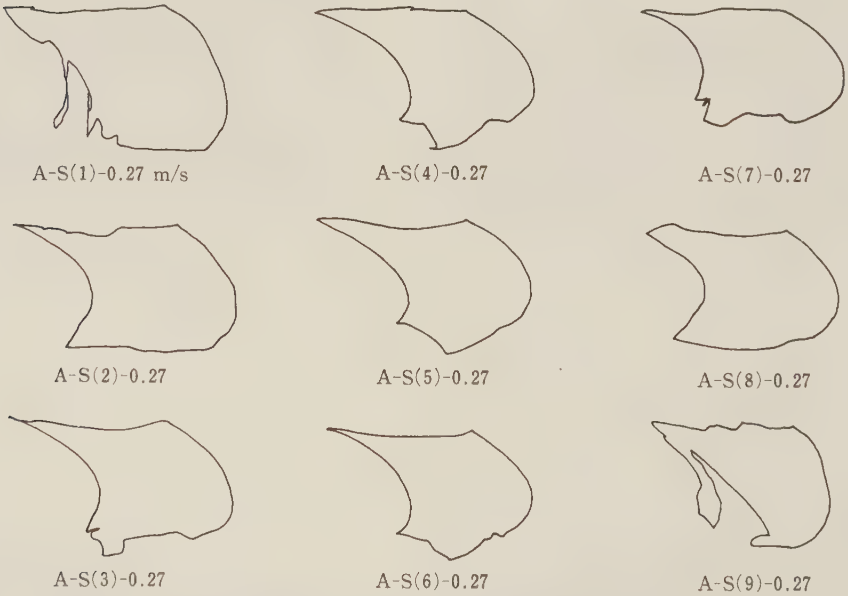
参考文献

1)　高知県水産試験場：沖合漁場利用養殖技術開発企業化試験研究成果報告書　昭和51年度～昭和56年度
2)　石川県水産試験場：沖合漁場利用養殖技術開発試験報告書　昭和52年度～昭和56年度
3)　岩手県：沖合漁場利用養殖技術開発試験報告書　昭和54年度～昭和56年度
4)　M. Tauchi : A Relation between Experiments on Model and Full Scale of Fishing Net, 日水誌, 3(4), 1934


A-S(1)-0 m/s
A-S(4)-0
A-S(7)-0
A-S(2)-0
A-S(5)-0
A-S(8)-0
A-S(3)-0
A-S(6)-0
A-S(9)-0

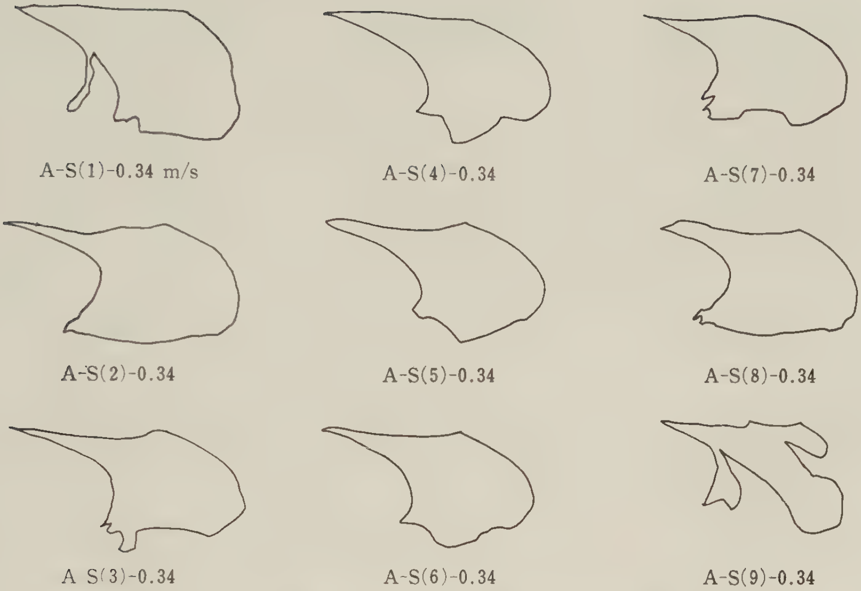
付図 1-1-1 中吊用重錘を採用したA網の断面形状（静水中）

Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0 m/s)


A-S(1)-0.27 m/s
A-S(4)-0.27
A-S(7)-0.27
A-S(2)-0.27
A-S(5)-0.27
A-S(8)-0.27
A-S(3)-0.27
A-S(6)-0.27
A-S(9)-0.27

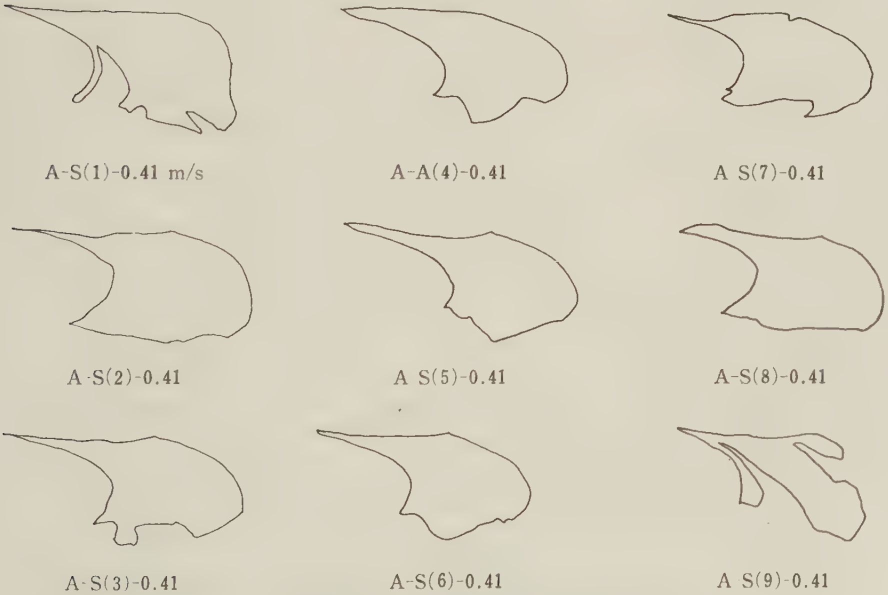
付図 1-1-2 中吊用重錘方式を採用したA網の断面形状（流速：0.27 m/s）

Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0.27 m/s)



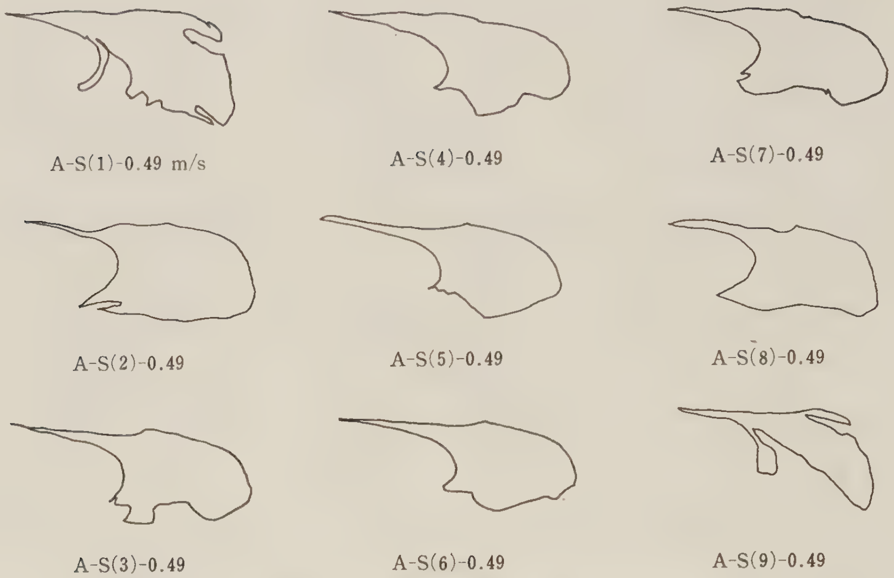
A-S(1)-0.34 m/s
A-S(4)-0.34
A-S(7)-0.34
A-S(2)-0.34
A-S(5)-0.34
A-S(8)-0.34
A S(3)-0.34
A-S(6)-0.34
A-S(9)-0.34

付図 1-1-3　中吊用重錘方式を採用したA網の断面形状（流速：0.34 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0.34 m/s)



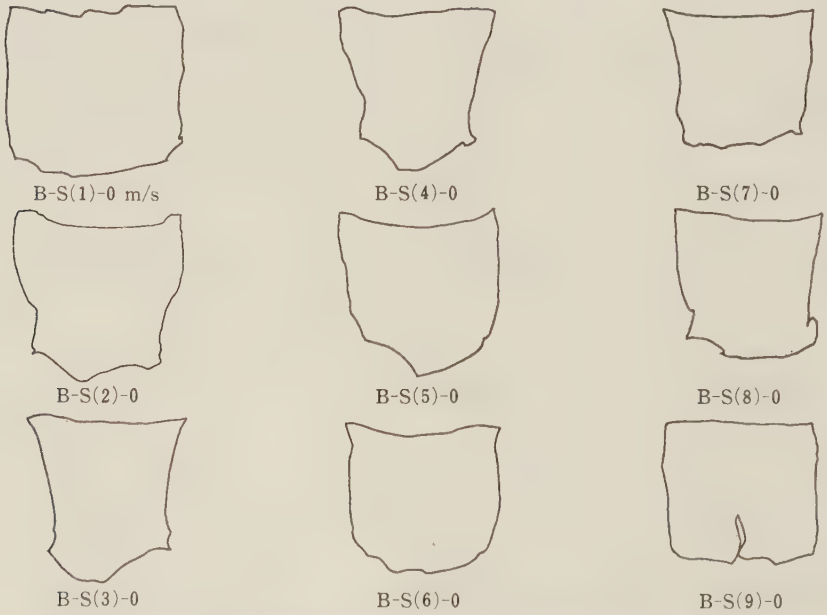
A-S(1)-0.41 m/s
A-A(4)-0.41
A S(7)-0.41
A-S(2)-0.41
A S(5)-0.41
A-S(8)-0.41
A-S(3)-0.41
A-S(6)-0.41
A S(9)-0.41

付図 1-1-4　中吊用重錘を採用したA網の断面形状（流速：0.41 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0.41 m/s)



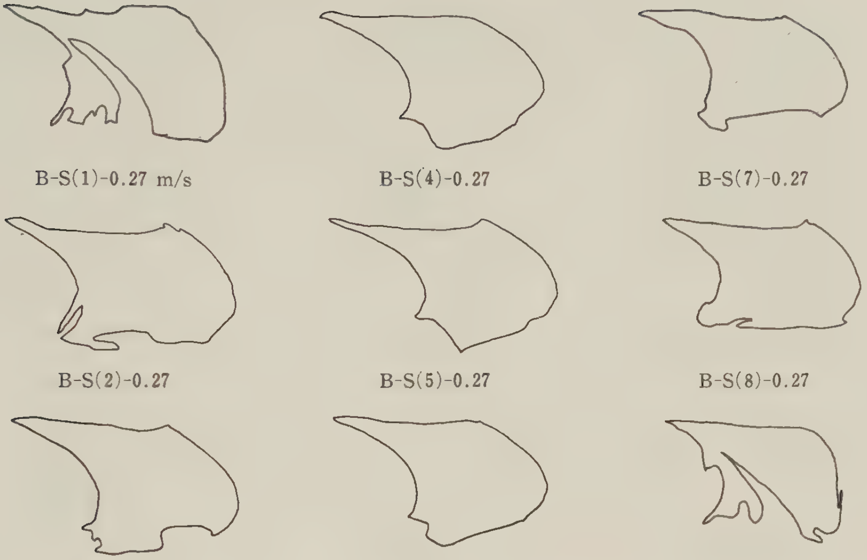
A-S(1)-0.49 m/s
A-S(4)-0.49
A-S(7)-0.49
A-S(2)-0.49
A-S(5)-0.49
A-S(8)-0.49
A-S(3)-0.49
A-S(6)-0.49
A-S(9)-0.49

付図 1-1-5 中吊用重錘方式を採用したA網の断面形状（流速：0.49 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity; 0.49 m/s)

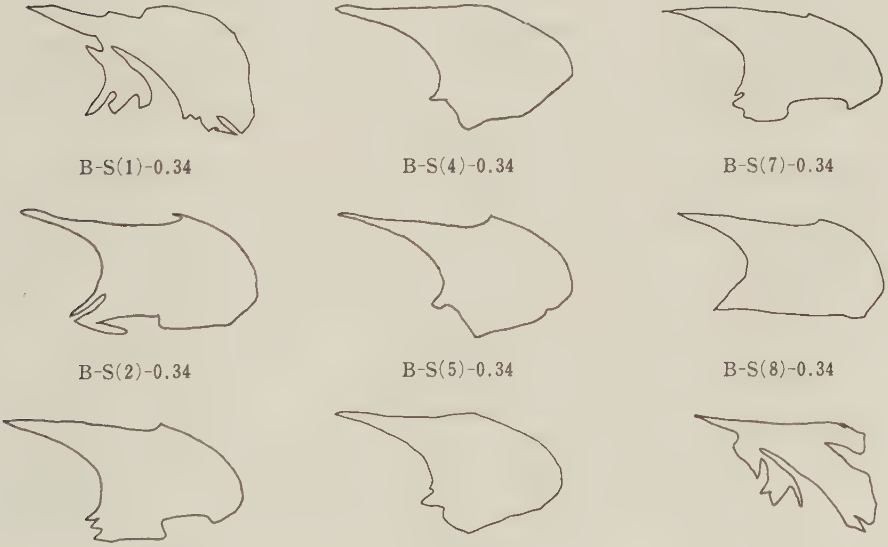


B-S(1)-0 m/s
B-S(4)-0
B-S(7)-0
B-S(2)-0
B-S(5)-0
B-S(8)-0
B-S(3)-0
B-S(6)-0
B-S(9)-0

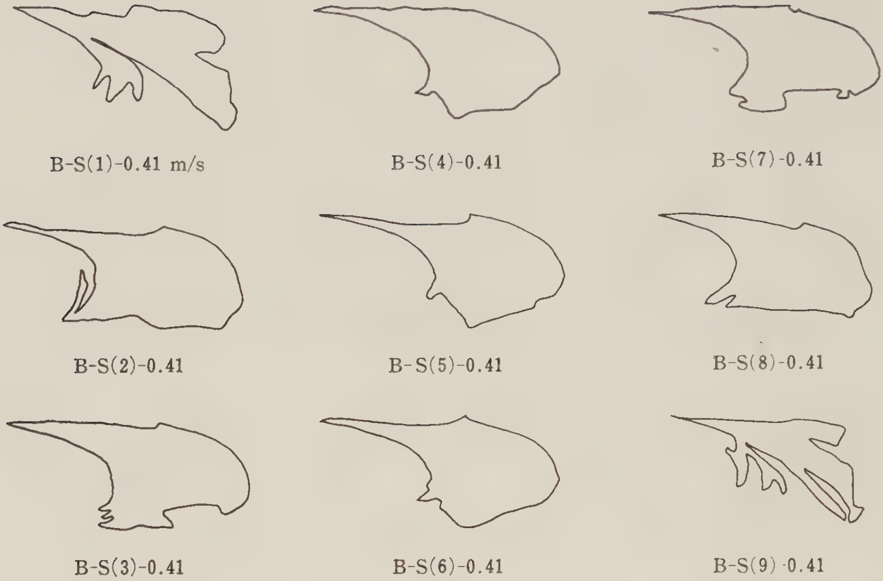
付図 1-2-1 中吊用重錘方式を採用したB網の断面形状（静水中）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity; 0 m/s)


B-S(1)-0.27 m/s B-S(4)-0.27 B-S(7)-0.27
B-S(2)-0.27 B-S(5)-0.27 B-S(8)-0.27
B-S(3)-0.27 B-S(6)-0.27 B-S(9)-0.27

付図 1-2-2 中吊用重錘方式を採用したB網の断面形状（流速：0.27 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0.27 m/s)


B-S(1)-0.34 B-S(4)-0.34 B-S(7)-0.34
B-S(2)-0.34 B-S(5)-0.34 B-S(8)-0.34
B-S(3)-0.34 B-S(6)-0.34 B-S(9)-0.34

付図 1-2-3 中吊用重錘方式を採用したB網の断面形状（流速：0.34 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0.34 m/s)

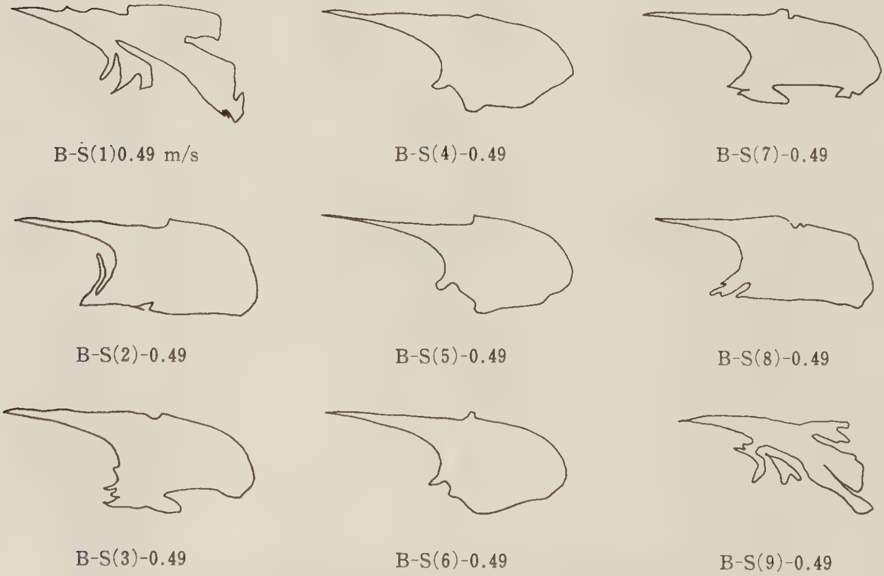


B-S(1)-0.41 m/s　B-S(4)-0.41　B-S(7)-0.41

B-S(2)-0.41　B-S(5)-0.41　B-S(8)-0.41

B-S(3)-0.41　B-S(6)-0.41　B-S(9)-0.41

付図 1-2-4 中吊用重錘方式を採用したB網の断面形状（流速：0.41 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0.41 m/s)

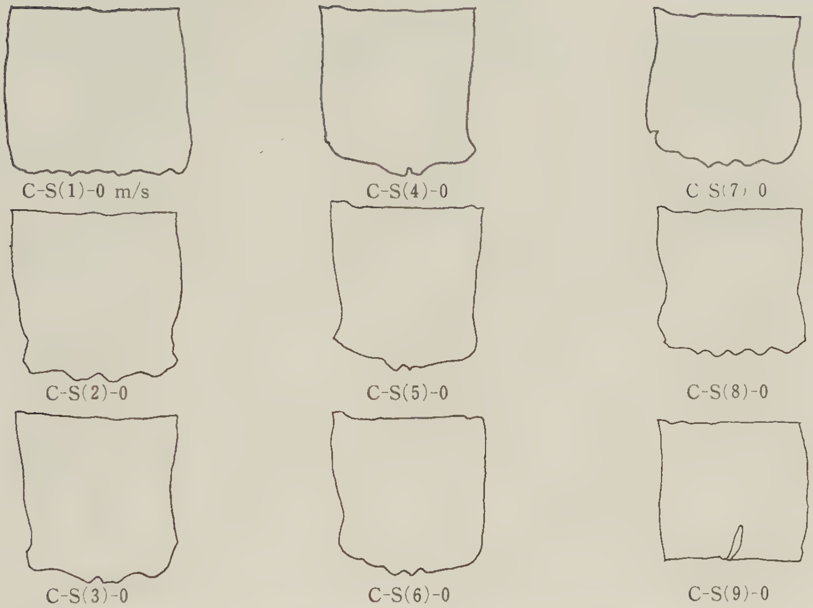


B-S(1)0.49 m/s　B-S(4)-0.49　B-S(7)-0.49

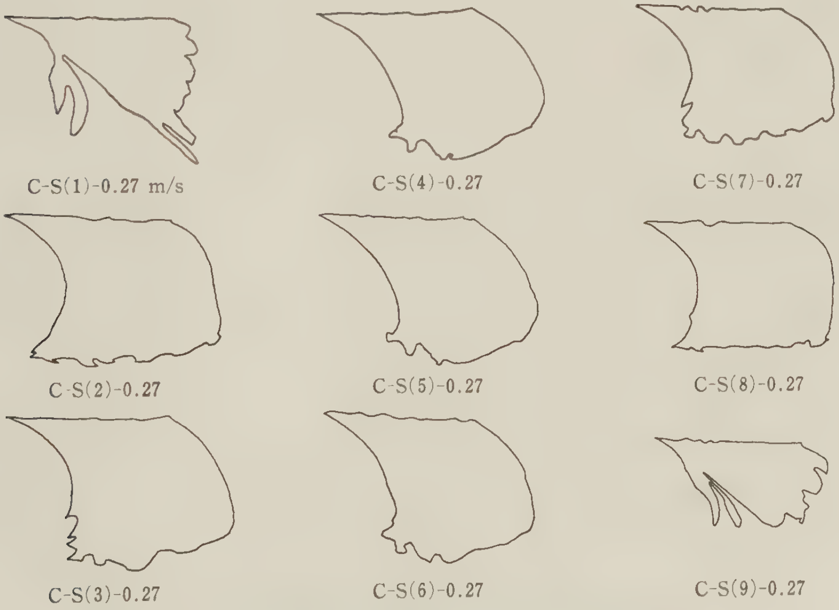
B-S(2)-0.49　B-S(5)-0.49　B-S(8)-0.49

B-S(3)-0.49　B-S(6)-0.49　B-S(9)-0.49

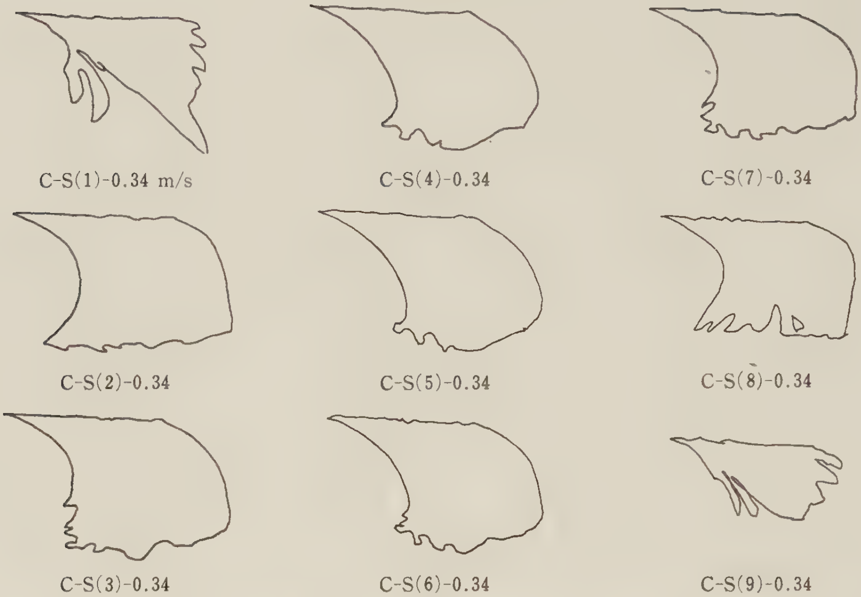
付図 1-2-5 中吊用重錘方式を採用したB網の断面形状（流速：0.49 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0.49 m/s)


C-S(1)-0 m/s
C-S(4)-0
C-S(7)-0
C-S(2)-0
C-S(5)-0
C-S(8)-0
C-S(3)-0
C-S(6)-0
C-S(9)-0

付図 1-3-1　中吊用重錘方式を採用したC網の断面形状（静水中）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0 m/s)

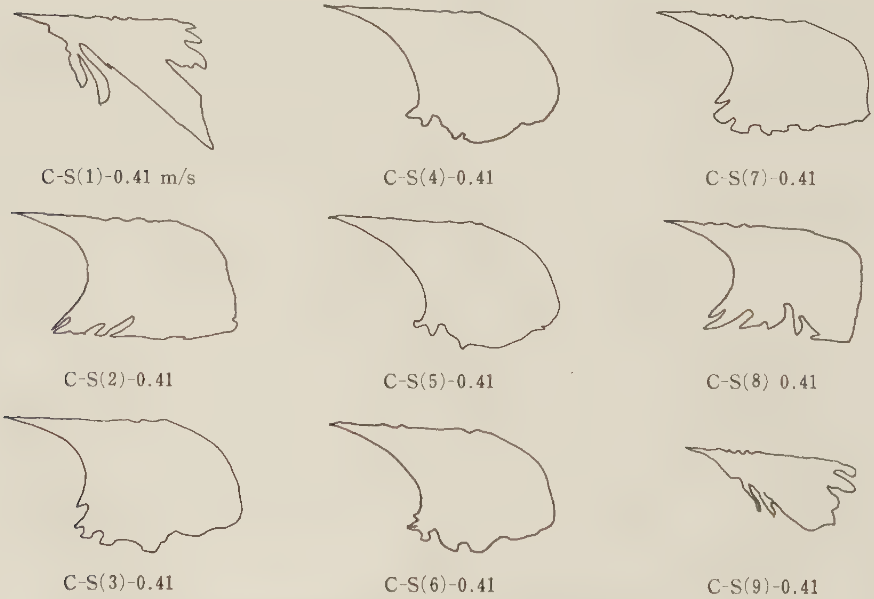

C-S(1)-0.27 m/s
C-S(4)-0.27
C-S(7)-0.27
C-S(2)-0.27
C-S(5)-0.27
C-S(8)-0.27
C-S(3)-0.27
C-S(6)-0.27
C-S(9)-0.27

付図 1-3-2　中吊用重錘方式を採用したC網の断面形状（流速：0.27 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0.27 m/s)



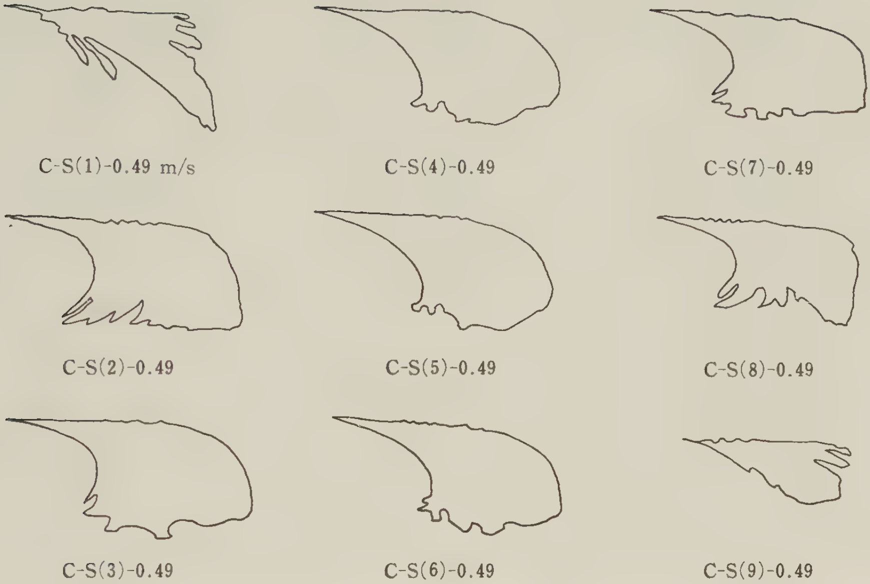
C-S(1)-0.34 m/s　C-S(4)-0.34　C-S(7)-0.34
C-S(2)-0.34　C-S(5)-0.34　C-S(8)-0.34
C-S(3)-0.34　C-S(6)-0.34　C-S(9)-0.34

付図 1-3-3　中吊用重錘方式を採用したC網の断面形状（流速：0.34 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity; 0.34 m/s)



C-S(1)-0.41 m/s　C-S(4)-0.41　C-S(7)-0.41
C-S(2)-0.41　C-S(5)-0.41　C-S(8) 0.41
C-S(3)-0.41　C-S(6)-0.41　C-S(9)-0.41

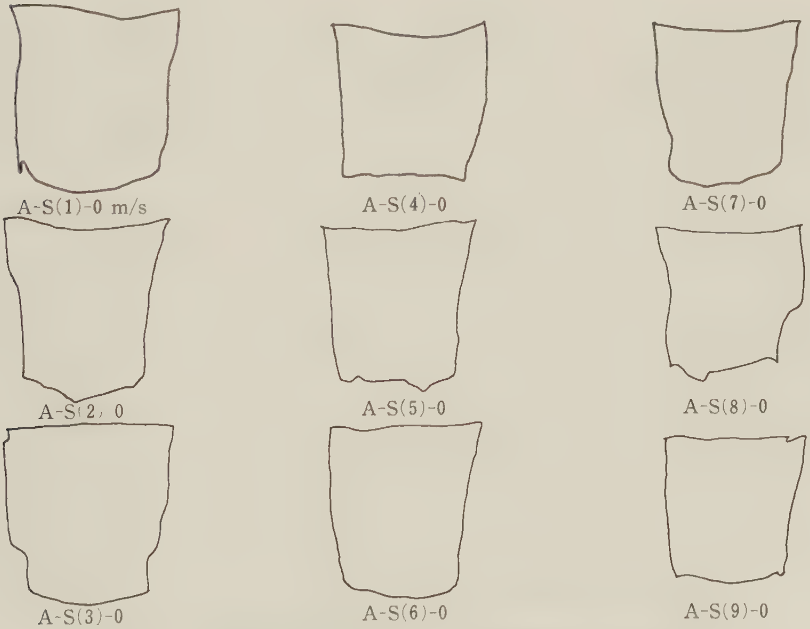
付図 1-3-4　中吊用重錘方式を採用したC網の断面形状（流速：0.41 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity; 0.41 m/s)


C-S(1)-0.49 m/s　C-S(4)-0.49　C-S(7)-0.49

C-S(2)-0.49　C-S(5)-0.49　C-S(8)-0.49

C-S(3)-0.49　C-S(6)-0.49　C-S(9)-0.49

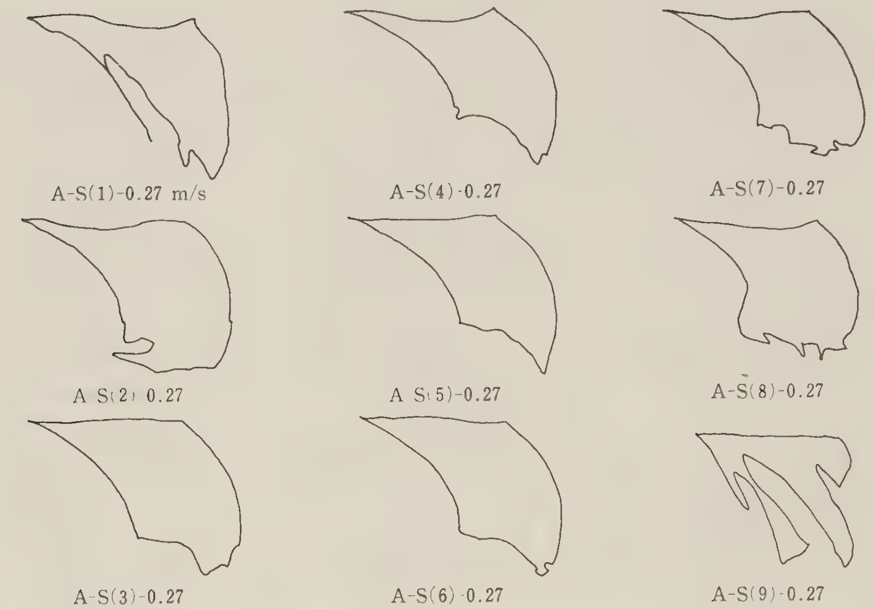
付図 1-3-5　中吊用重錘方式を採用したＣ網の断面形状（流速：0.49 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-1 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0.49 m/s)


A-S(1)-0 m/s　A-S(4)-0　A-S(7)-0

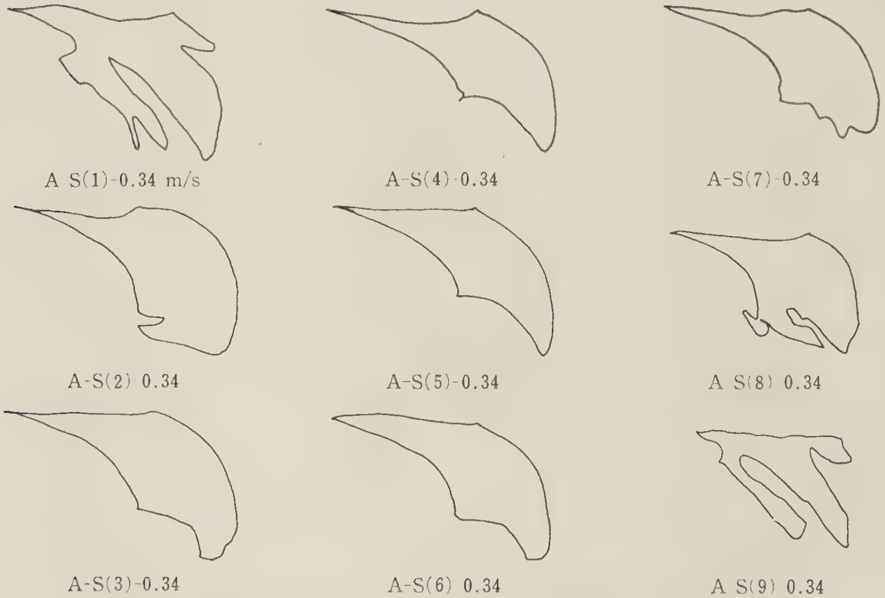
A-S(2)-0　A-S(5)-0　A-S(8)-0

A-S(3)-0　A-S(6)-0　A-S(9)-0

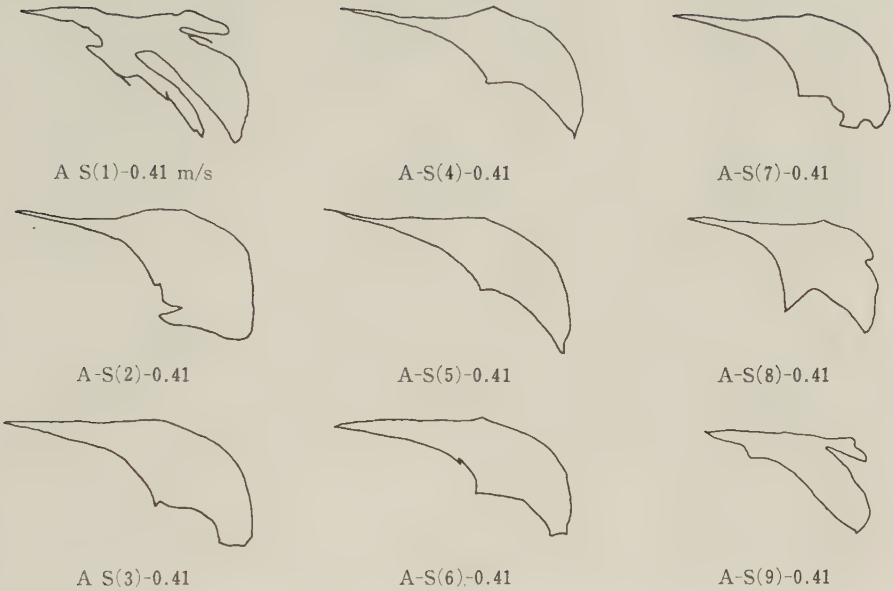
付図 2-1-1　大型沈子方式を採用したＡ網の断面形状（静水中）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0 m/s)


A-S(1)-0.27 m/s
A-S(4)-0.27
A-S(7)-0.27
A S(2) 0.27
A S(5)-0.27
A-S(8)-0.27
A-S(3)-0.27
A-S(6)-0.27
A-S(9)-0.27

付図 2-1-2 大型沈子方式を採用したA網の断面形状（流速：0.27 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0.27 m/s)


A S(1)-0.34 m/s
A-S(4)-0.34
A-S(7)-0.34
A-S(2) 0.34
A-S(5)-0.34
A S(8) 0.34
A-S(3)-0.34
A-S(6) 0.34
A S(9) 0.34

付図 2-1-3 大型沈子方式を採用したA網の断面形状（流速：0.34 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0.34 m/s)

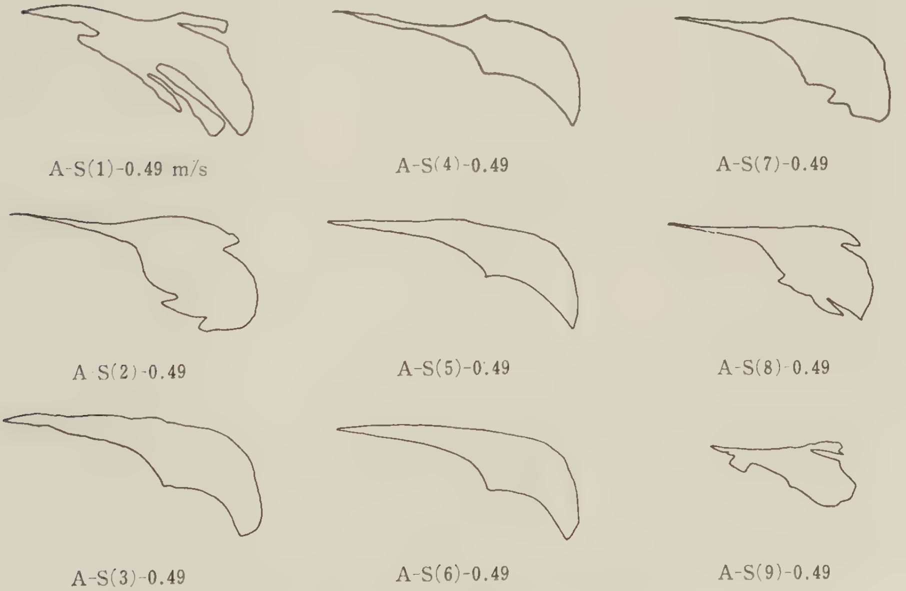


A S(1)-0.41 m/s　A-S(4)-0.41　A-S(7)-0.41

A-S(2)-0.41　A-S(5)-0.41　A-S(8)-0.41

A S(3)-0.41　A-S(6)-0.41　A-S(9)-0.41

付図 2-1-4　大型沈子方式を採用したA網の断面形状（流速：0.41 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity; 0.41 m/s)

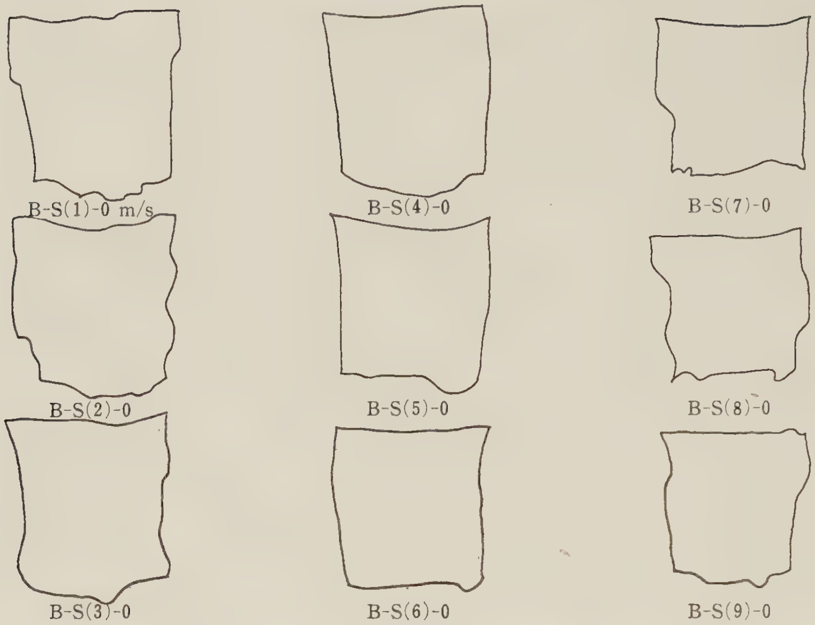


A-S(1)-0.49 m/s　A-S(4)-0.49　A-S(7)-0.49

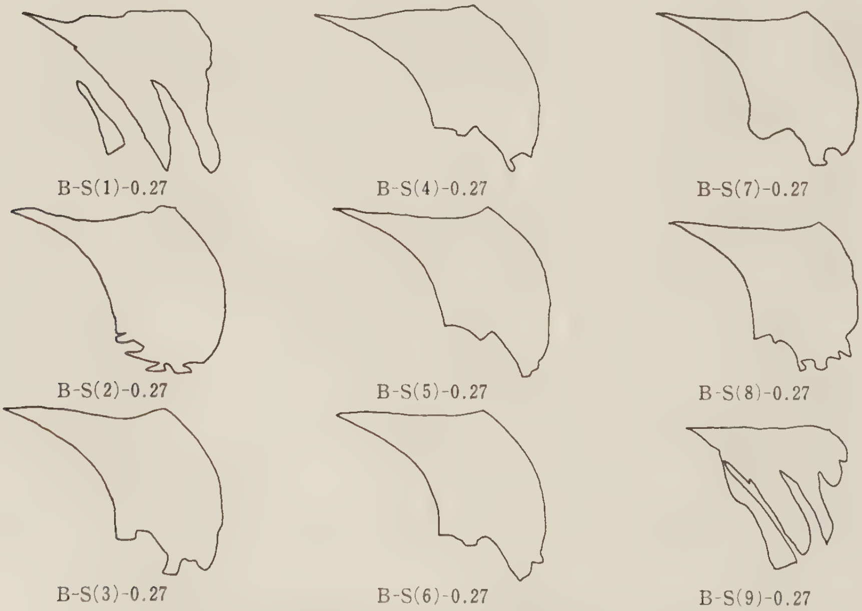
A S(2)-0.49　A-S(5)-0.49　A-S(8) 0.49

A-S(3)-0.49　A-S(6)-0.49　A-S(9)-0.49

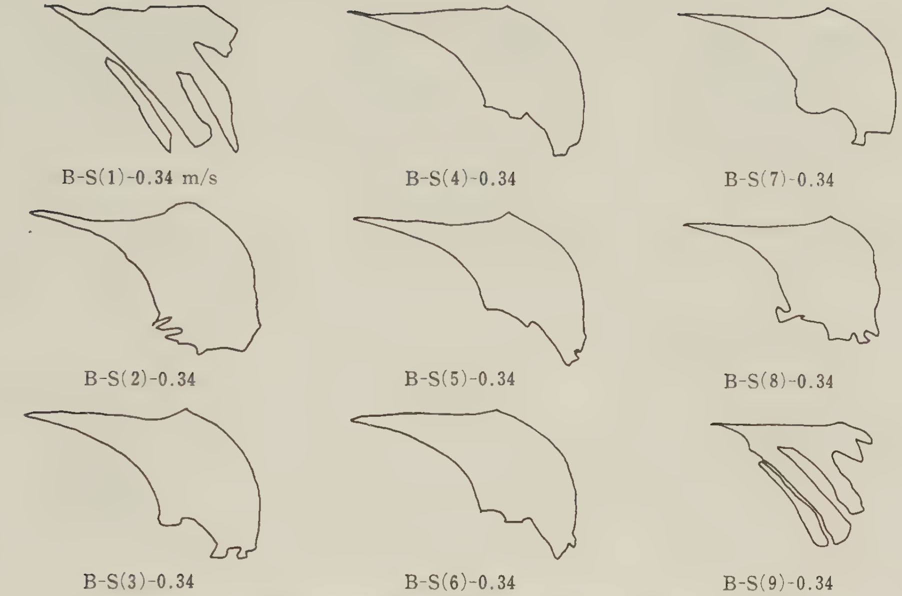
付図 2-1-5　大型沈子方式を採用したA網の断面形状（流速：0.49 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of A type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity; 0.49 m/s)


B-S(1)-0 m/s
B-S(4)-0
B-S(7)-0
B-S(2)-0
B-S(5)-0
B-S(8)-0
B-S(3)-0
B-S(6)-0
B-S(9)-0

付図 2-2-1 大型沈子方式を採用したB網の断面形状（静水中）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow
(Current velocity ; 0 m/s)


B-S(1)-0.27
B-S(4)-0.27
B-S(7)-0.27
B-S(2)-0.27
B-S(5)-0.27
B-S(8)-0.27
B-S(3)-0.27
B-S(6)-0.27
B-S(9)-0.27

付図 2-2-2 大型沈子方式を採用したB網の断面形状（流速：0.27 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0.27 m/s)

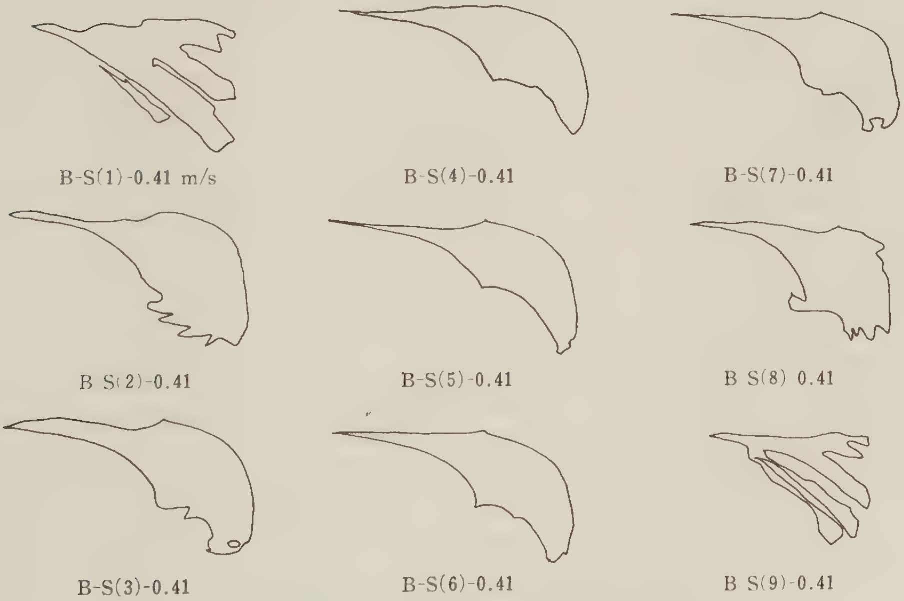


B-S(1)-0.34 m/s　B-S(4)-0.34　B-S(7)-0.34

B-S(2)-0.34　B-S(5)-0.34　B-S(8)-0.34

B-S(3)-0.34　B-S(6)-0.34　B-S(9)-0.34

付図 2-2-3　大型沈子方式を採用したB網の断面形状（流速：0.34 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow
(current velocity ; 0.34 m/s)

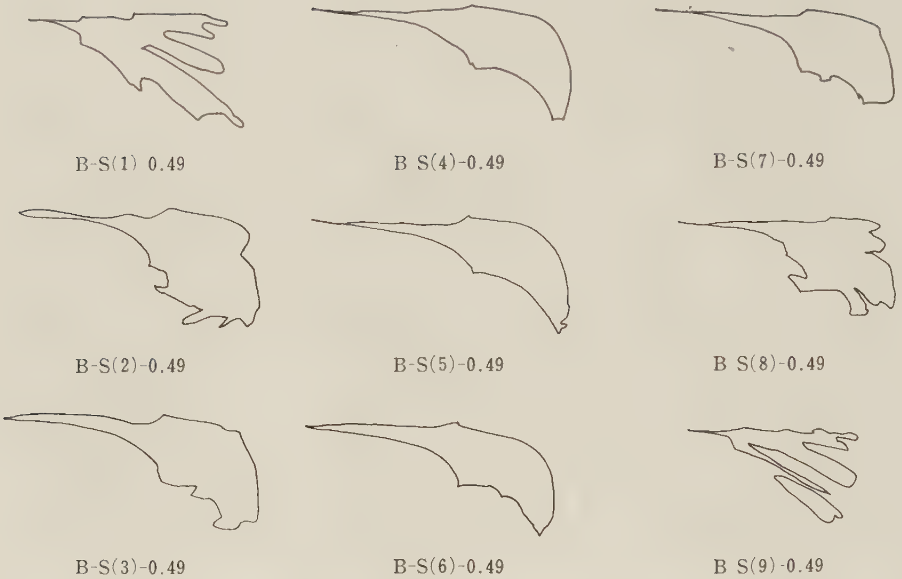


B-S(1)-0.41 m/s　B-S(4)-0.41　B-S(7)-0.41

B-S(2)-0.41　B-S(5)-0.41　B-S(8)-0.41

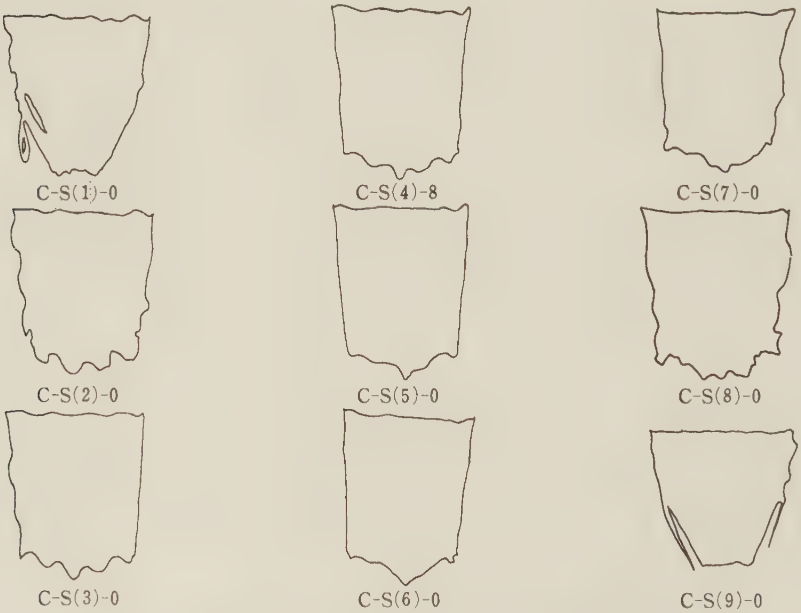
B-S(3)-0.41　B-S(6)-0.41　B-S(9)-0.41

付図 2-2-4　大型沈子方式を採用したB網の断面形状（流速：0.41 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against ffow
(current velocity ; 0.41 m/s)



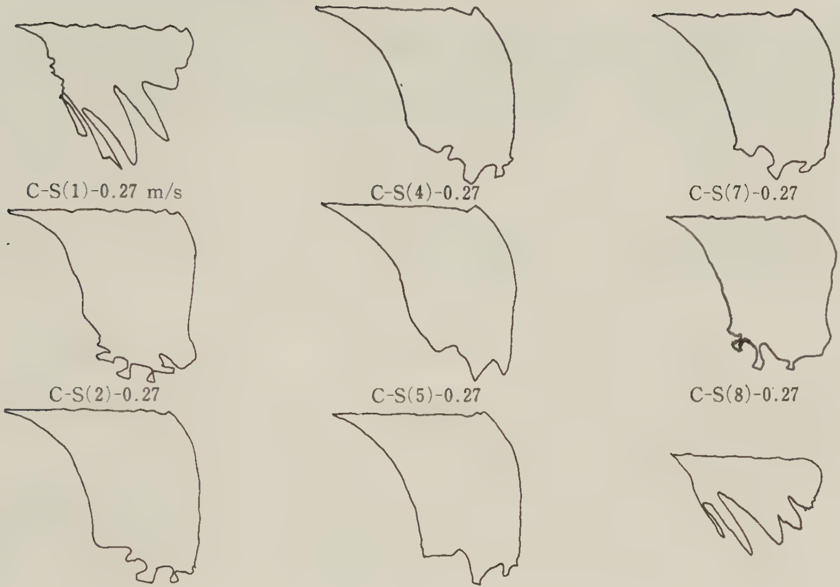
B-S(1) 0.49
B S(4)-0.49
B-S(7)-0.49
B-S(2)-0.49
B-S(5)-0.49
B S(8)-0.49
B-S(3)-0.49
B-S(6)-0.49
B S(9)-0.49

付図 2-2-5 大型沈子方式を採用したB網の断面形状（流速：0.49 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of B type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0.49 m/s)



C-S(1)-0
C-S(4)-8
C-S(7)-0
C-S(2)-0
C-S(5)-0
C-S(8)-0
C-S(3)-0
C-S(6)-0
C-S(9)-0

付図 2-3-1 大型沈子方式を採用したC網の断面形状（静水中）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity ; 0 m/s)



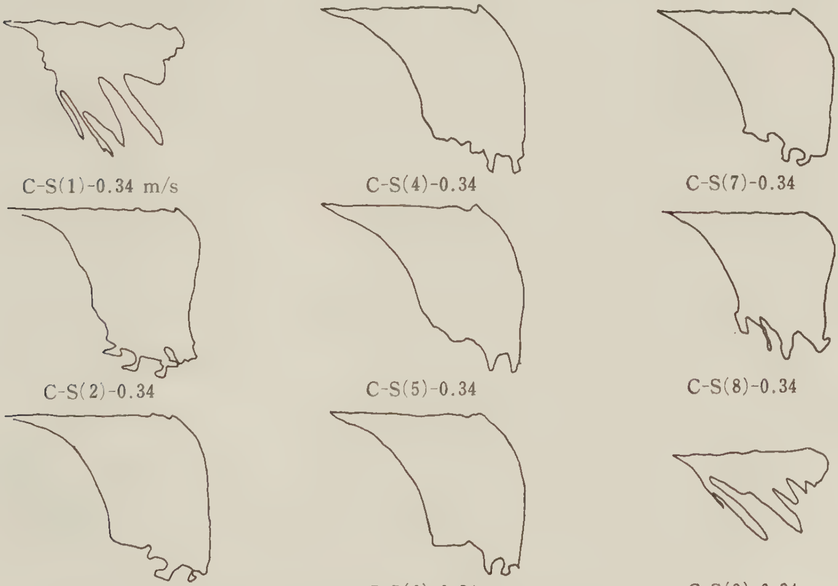
C-S(1)-0.27 m/s　C-S(4)-0.27　C-S(7)-0.27

C-S(2)-0.27　C-S(5)-0.27　C-S(8)-0.27

C-S(3)-0.27　C-S(6)-0.27　C-S(9)-0.27

付図 2-3-2　大型沈子方式を採用したＣ網の断面形状（流速：0.27 m/s）

Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity; 0.27 m/s)



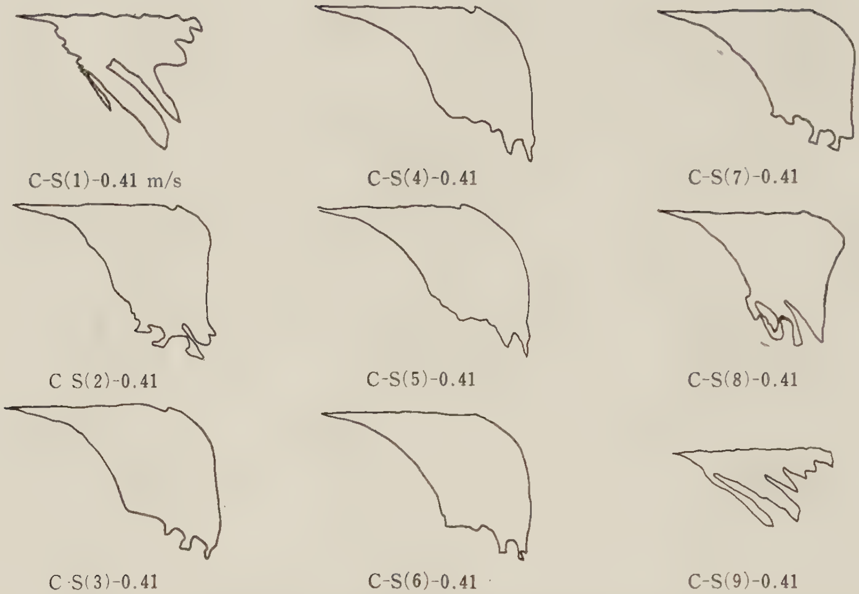
C-S(1)-0.34 m/s　C-S(4)-0.34　C-S(7)-0.34

C-S(2)-0.34　C-S(5)-0.34　C-S(8)-0.34

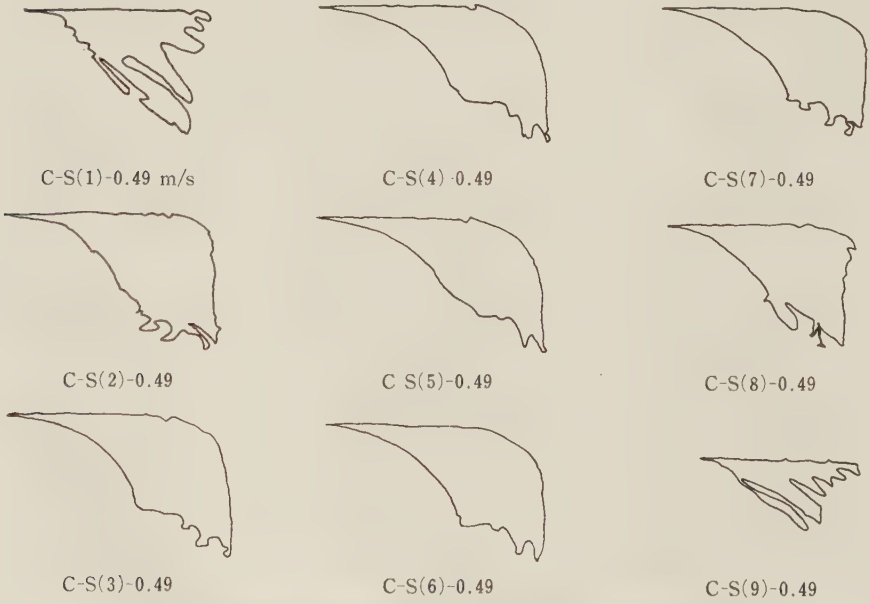
C-S(3)-0.34　C-S(6)-0.34　C-S(9)-0.34

付図 2-3-3　大型沈子方式を採用したＣ網の断面形状（流速：0.34 m/s）

Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow (current velocity; 0.34 m/s)


C-S(1)-0.41 m/s　C-S(4)-0.41　C-S(7)-0.41
C S(2)-0.41　C-S(5)-0.41　C-S(8)-0.41
C-S(3)-0.41　C-S(6)-0.41　C-S(9)-0.41

付図 2-3-4　大型沈子方式を採用したC網の断面形状（流速：0.41 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow
（current velocity ; 0.41 m/s）


C-S(1)-0.49 m/s　C-S(4) 0.49　C-S(7)-0.49
C-S(2)-0.49　C S(5)-0.49　C-S(8)-0.49
C-S(3)-0.49　C-S(6)-0.49　C-S(9)-0.49

付図 2-3-5　大型沈子方式を採用したC網の断面形状（流速：0.49 m/s）
Photographic illustrations of cross-sectional forms of C type model net which have the sinker device shown in fig. 3-2 as a counter-measure against flow
（current velocity ; 0.49 m/s）

Studies on Behavior of Fish Cages against Flow of Water

—On Relationship between Volume of Fish Cages and Current Velocity—

By

Yoichi OSAWA, Yozo TAWARA and Hajime TAKETOMI

Summary

Authors carried out a model experiment so as to find out relationships between volume of fish cages and current velocity. The model cages used for the experiment consisted of different three types in construction, being reduced to the scale 1/20 of an actual fish cages, which are all uniform in dimension.

The experiments were performed with various level of current velocity in the circulating water channel of our institute.

Authors found out the following facts as the result of the experiment: The volume of the fish cages is affected by magnitude of the current. It seems clear that the difference among the volume of these three types of fish cages under the same level current velocity is caused by the difference in counter-measure taken for untiflow of fish cages, volume of sinkers attached to the bottom frame and the value of the ratio between diameter of twine and length of bar.

水工研報告 6
1985 pp. 323~329

釣針にかかる魚の引張力

三次　信輔*・井上　喜洋*

目　　次

1. 緒　　言……323
2. 実験方法……323
3. 実験結果……325
4. 結　　言……327
参考文献……328
Summary……329

1. 緒　　言

近来イカ釣りを始めカツオ竿釣り，底魚一本釣り漁業など省力化を目的とした自動釣機の実用化が進んでいるが釣機の動力源，釣糸の有効な太さなどを決めるためには漁獲対照魚の釣糸を引張る力が重要な要素となる。

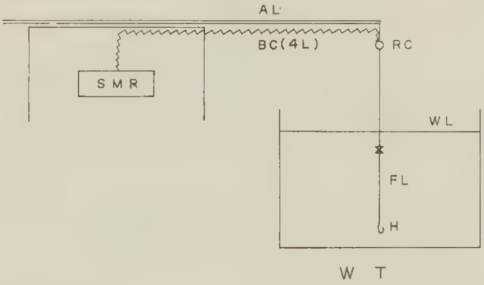
底延縄や底魚一本釣りのごとく比較的静止している漁具にかゝる魚は緩慢な游泳状態で針がかりするので釣糸を引張る力，範囲も小さいと思はれるが表層で行はれるカツオやサバの竿釣りでは相当な速度の魚体が針がかりするので衝撃的な力が釣糸にかかる。曳縄釣りの場合では更に大きい力が加はるものと推定される。

このように釣糸に対する魚の引張力は延縄，竿釣り，曳縄など漁具の種類によりまた魚の体形，行動習性などにより異なると思はれる。

今回は釣りの基本である竿釣りに対する魚の引張力について実験を行ったので報告する。

2. 実験方法

図1に示すごとくコンクリート製屋内水槽（長さ2m，巾1m，深さ1m）に供試魚を50尾入れ，魚が餌付きの釣針にかかった場合および釣針を口腔，背および尾鰭部にかけて水槽に放した場合の魚の釣糸を引張る力を測定した。水面下の釣糸の長さは前者が0.7m，後者が0.5mである。測定方法は竿の先端部の釣糸に連結したロードセルにかかる荷重を歪計の自記記録装置に描かせる方法で魚が針がかりしてから1～2分間づつ記録をとった。実験用釣竿は表1に示すごとく鉄製の丸棒，グラスロッドの硬竿，軟竿の3種類で竿の調子（弾性によ



AL：釣竿　　H　：釣針
RC：ロードセル　SMR：記録装置
FL：釣糸　　BC　：4芯コード

図 1　実験装置

The apparatus for measuring the pulling force of fish.

表 1　実験用釣竿の規格

The standard of a fishing rod

釣　竿	材　料	全　長 (m/m)	使用長 (m/m)	継ぎ数 (本)	太　さ　(m/m)			
					元 1.5m	中間 1.0m	・・ 0.5m	穂先 0m
鉄　棒	丸　棒	300	150	1	12.0	12.0	12.0	12.0
硬　竿	グラスロッド	290	150	3	13.5	10.7	6.5	2.7
軟　竿	グラスロッド	320	150	5	7.5	6.1	3.5	1.7

---

* 漁業生産工学部

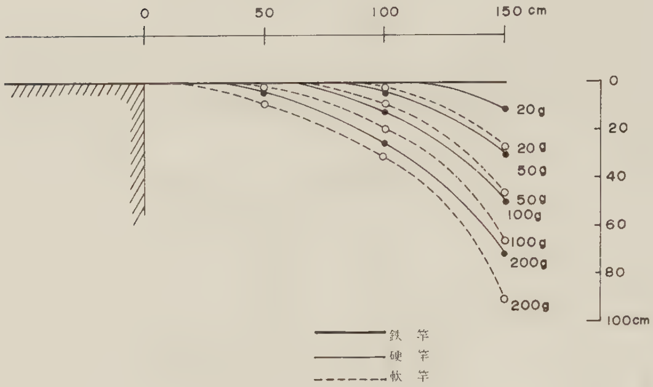


図 2　実験用釣竿の調子
Types of fishing rods.

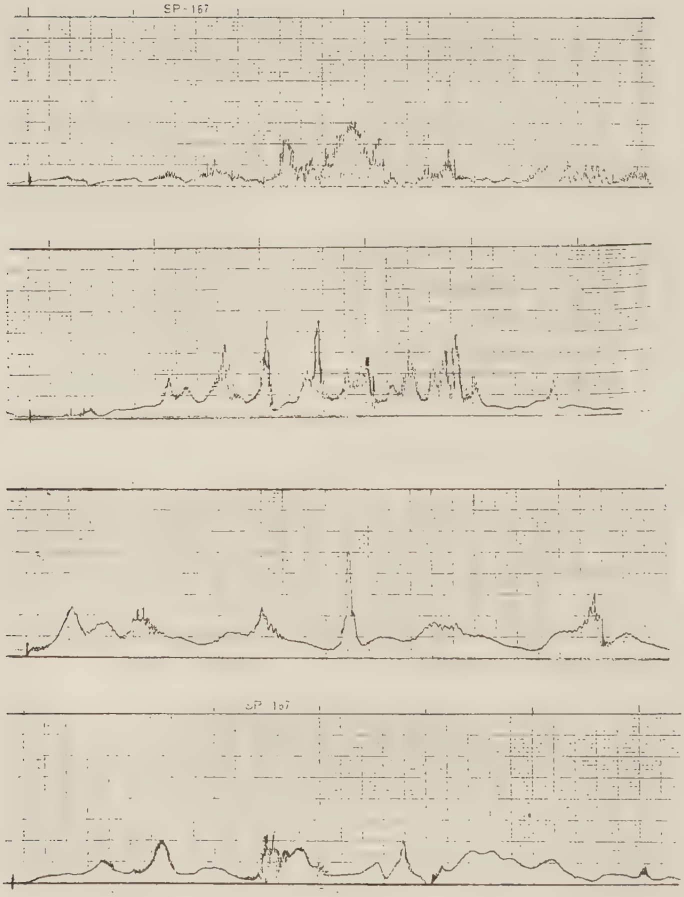


図 3　魚の引張力の記録例
An example of a chart showing the pulling force of a fish.

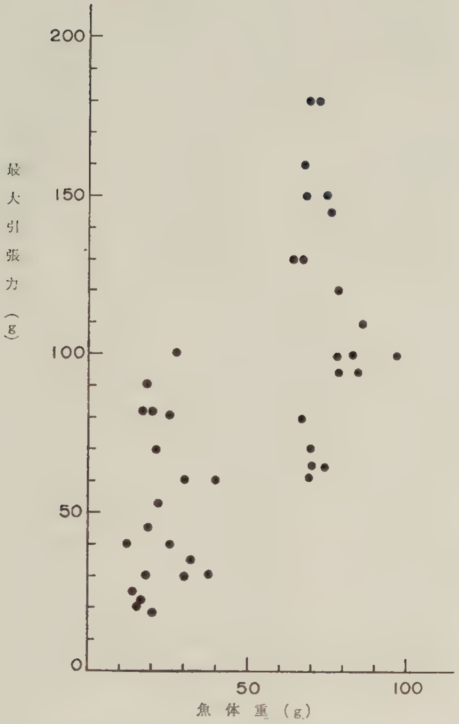


図 4　鉄竿による引張力

The relation between the body weight and the pulling force of fish (Iron rod).

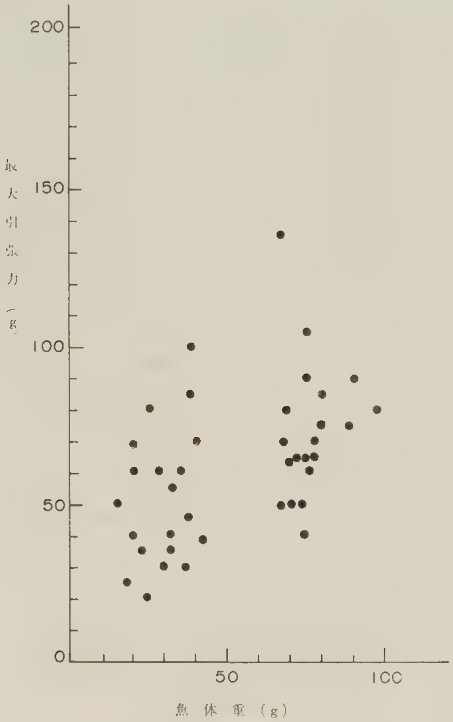


図 5　硬竿による引張力

The relation between the body weight and the pulling force of fish (Hard rod)

るしなり具合）の模式図を図 2 に示す。これは釣針部に20, 50, 100, 200 g の重錘を付けて釣竿のしなり具合を測定したもので実線が硬竿，点線が軟竿で鉄製竿の曲がりはない。

供試魚は体重12～105 g，体長 7～15 cm のマゴイ，実験時の水温は21°±2.0°C，水面上の自然照度は10^3～5×10^3 Lux である。

3.　実験結果

前述の方法により水槽内のマゴイについて測定した記録の例を図 3 に示す。針がかり後釣糸を引張る強弱，間隔など一様ではないが今回は実験記録のうち魚が引張る最大の力を求め比較検討を行った。

3.1　釣竿の硬さと引張力

同じ仕掛けで同じ魚を釣り上げる場合にプロの手釣りに対しアマは竿を使用しなければ上げられないのが通常である。プロは経験や熟練度のほかに上半身，肩，肘，手首や指などの関節を上手に利用して竿の代役を果しているものと思はれる。このような釣竿の効用を考えた場合竿の硬さが魚の引張力に影響するものかどうか，こゝでは鉄製の竿，太いグラスロッドの硬い竿同じく細い軟い竿を使用して魚の引張力を測定した。釣針位置は底より10 cm上，餌は練り餌または赤虫を使用した。

表 2　釣竿の硬さと引張力との分散分析表

Analysis table of variance
(Pulling force and hardness of rods)

要　因	平方和	自由度	分　散	F　比
群　間	30415.2	2	15207.6	20.32**
群　内 （残差）	42653.1	57	**	
計	73068.3	59		

鉄竿，硬竿および軟竿使用における魚の最大引張力（M.P.F）と魚体重との関係をみると図 4，5，6 のようになる。図より45 g 以下についての M.P.M を比較すると差はあまりみられないが65 g 以上の M.P.M は鉄竿＞硬竿＞軟竿が認められ竿の種類による M.P.F についての分散分析を行うと表 2 のようになる。表より鉄，

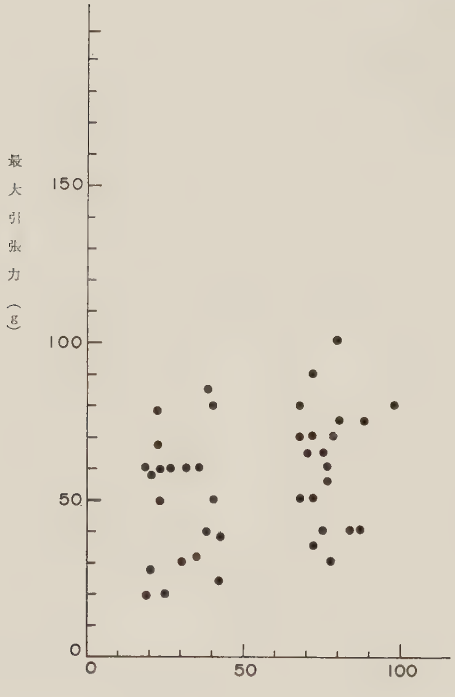


図 6　軟竿による引張力

The relation between fish body weights and pulling forces of fish (Soft rod)

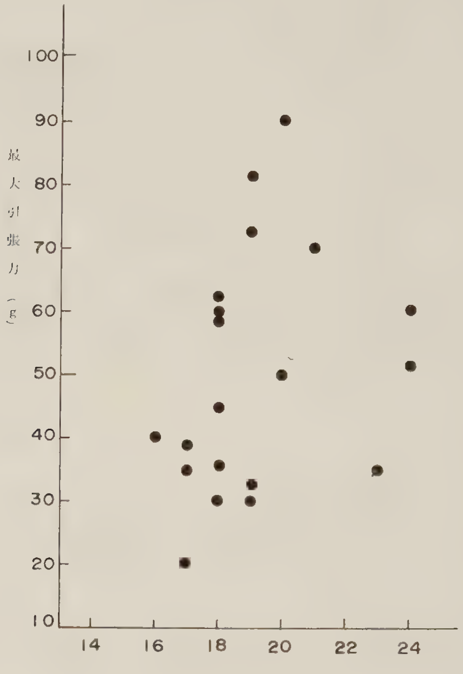


図 7　口腔部にかけた場合の引張力

The relation between the body weight and the pulling force of fish (Upper jaw)

硬，軟竿の三者の間には1％以下の危険率で有意差が認められる。

以上より釣竿の硬軟による魚の最大引張力は小型魚（体重12〜45 g）では差がみられないが一回り大きい魚（65〜105 g）では鉄竿使用が最も大きく次いで硬竿，軟竿となる。即ち竿の弾性が柔軟になるほど魚の引きを弱まらせるものと思はれる。

3.2　針がかりの場所と引張力

前項の餌付き針の実験中に鰓，腹や尾部近辺にも針がかりすることがあり，かかる場所によって引張力が異なる。

こゝでは口のほかに背，尾鰭部に針を掛け水槽に放して夫々の M.P.F について比較を行った。

竿はグラスロッドの硬竿，供試魚は体重16〜24 gの小型魚で夫々の M.P.F を図7，8，9に示す。針がかりの場所の相違による M.P.F について分散分析を行うと表3のようになり三者の間には1％以下の危険率で有意差が認められ，図より尾鰭部が最も大きく，口，背鰭部では差はみられないが前者は20〜90 gと巾広く，後者は40〜80 gと比較的安定した値を示しているのが特徴である。

表 3　針がかり場所と引張力との分散分析表

Analysis tadle of variance
(Pulling force and caught by hook)

要　因	平方和	自由度	分　散	F　比
群　間	10485.3	2	5242.64	17.28**
群　内 （残差）	17296.9	57	- **	
計	27782.2	59		

3.3　針がかりの場所と行動

3.1 の実験中に表4にみられるように口腔以外に鰭や鼻孔部などにも針がかりする場合があった。口腔部68.2％，針外れ 26.8％ その他5％と割合いは少いが針上5 cm のカミツブシの錘を飲みこむ場合もみられた。なお口腔部の針がかりは上アゴが最も多く次いで横，下アゴである。また針外れが比較的多いのは，人為的な針合はせをしないこともあるが表5にもみられるように餌を飲みこんだあと動きを止める，後退，首振りなどの行動をとりながら針を吐き出す状況がみられた。その間におけ

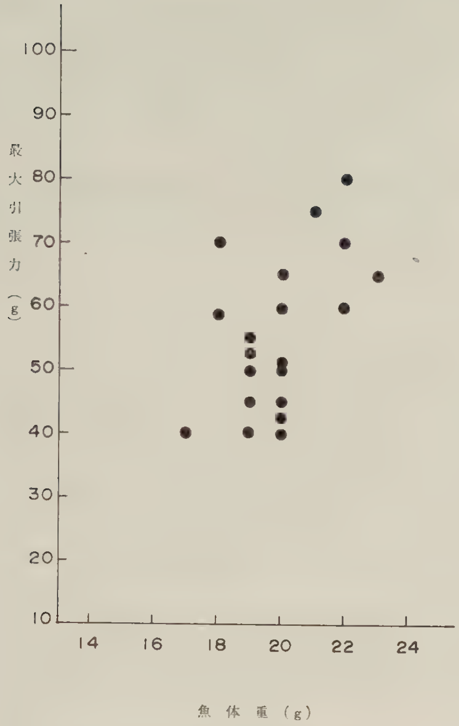


図 8 背鰭部にかけた場合の引張力

The relation between the body weight and the pulling force of fish (Dorsal fin)

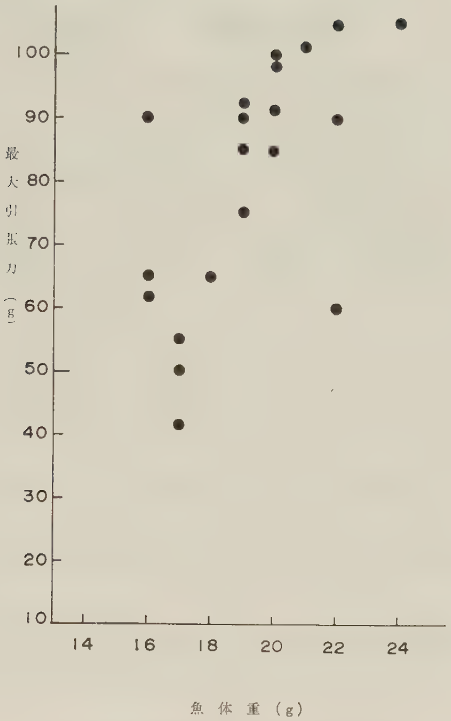


図 9 尾鰭部にかけた場合の引張力

The relation between the body weight and the pulling force of fish (Caudal fin)

表 4 針がかりの場所

The pointt of caught by hook

口腔			その他					針外れ	計
上	下	横	鰓	腹	目	鼻	錘		
70	29	51	2	2	1	4	2	59	220(尾)
68.2			5.0					26.8	100(%)

表 5 針外しの行動

The behaviour of releasing to hook

種類	状況	尾数	引張力(g)		
			最小	最大	平均
1	飲む→止　る→外れ	7	5	18	11.1
2	飲む→後　退→外れ	3	4	6	5.3
3	飲む→首振り→外れ	7	4	14	8.9

注（魚体重 65～105 g）

る歪計の記録にみられた引張力は表にもみられるように4～18 g ていどの小さな値である。

4. 結　言

省力化を目的として実用化されつゝある自動釣機を開発するためには動力源の容量，揚縄時の動力制御，魚信感知装置および釣糸の有効な太さの決定などがあげられるが魚がどのくらいの力で釣糸を引張るかは重要な要素と思はれ今回はそれらについて水槽内のマゴイを対照に基礎的な実験を行った。

カツオやサバの一本釣り，曳縄釣りなどには竿が使われ竿の硬さ（弾性）が重要視されている。全然曲がらない鉄竿，グラスロッドの硬，軟竿使用に対する魚の引張力との関係は竿の弾性が柔軟なほど魚の引きを弱らせる効果が認められた。

魚が針がかりする場所と引張力との関係は尾部付近にかかった場合が最も大きく，口腔と背鰭部との差はみられないが前者の引きの強さは不安定，後者は安定した値を示した。

魚が針がかりして餌だけをとり，釣針を吐き出す動作としてスヾキの鰓洗いなど顕著な行動をとる魚もいるがコイはゆっくり前進，後退または頭部を振るなどして針を外す行動をとる。魚信に対する感知作動も自動釣機には必要となる。

参考文献

1）大島泰雄：鉤にかかった魚の引きの強さについて，日水誌，Vol 19，No. 4，1953

2）小池　篤：鉤にかかった魚の引きの強さについて（予報），日水誌，Vol. 20，No. 8，1954

3）渡辺信雄：カツオの魚体密度・体温及び游泳速度に関する測定，日水誌，Vol. 11，No. 4，1956

4）Richard, Baindridge: The Speed to Size to the Frequency and Amplitude of the Tail Beat, The Jouanal of Experiment Zoology，1964

5）坂詰　博・金盛浩吉：曳縄釣漁業の研究―III 操業中に鉤にかかった魚の引きの強さについて，日水誌，Vol. 37，No. 10，1971

6）金盛浩吉・坂詰　博：曳縄釣漁業の研究―V カツオの口切れによる釣り落しについて，和歌山水試報告，Vol. 40，No. 6，1974

The Pulling Force of Fish Caught by Fishing Hook

By

Shinsuke MITSUGI and Yoshihiro INOUE

Summary

The pulling force of fish varies depending on fish behaviours, shapes of fish and kind of fishing gears, e, g. pole and line, trolling line and long line. For this particular study, authors measured with a strain meter the pulling force of carp *“Cyprinus carpio linne”* under various conditions.

The investigations provided the authors with the following general conclusions:

1. Large sized fishes have stronger pulling force than small sized ones.
2. The pulling force of large sized fishes varies depending on the strength of fishing poles.
3. Depending on the positions of hook (mouth, back and tail), the pulling forces are varied. The fish with hooks fixed on their tails, pull stronger than the others.

水産工学研究所の機構及び所在地

所長	茨城県鹿島郡波崎町海老台	電話 04794(4)4961
企画連絡室	同　上	同　上
庶務課	同　上	同　上
水産土木工学部	同　上	同　上
漁船工学部	東京都中央区勝どき5—5—1	03(531)7741
漁業生産工学部	同　上	03(533)2944
勝どき庶務分室	同　上	同　上

ORGANIZATION OF NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF FISHERIES ENGINEERING FISHERIES AGENCY

Director General
Ebidai, Hasaki-machi, Kashima-gun, Ibaraki, Japan

Research Planning and Coordination Division
do.

General Affairs Section
do.

Aquaculture and Fishing Port Engineering Division
do.

Fishing Boat and Instrument Division
5-1, Kachidoki 5-chome, Chuo-ku, Tokyo, Japan

Fishing Gear and Methods Division
do.

General Affairs Section Kachidoki Branch
do.

水産工学研究所研究報告　第6号
昭和60年3月10日　印　刷
昭和60年3月16日　発　行

水産庁　水産工学研究所

茨城県鹿島郡波崎町海老台（郵便番号 314—04）
発行者　土屋　孟
印刷所　奥村印刷株式会社
印刷者　奥村正雄

水産工研究所組織図

所長
- 企画連絡室
- 庶務課—課長補佐
  - 庶務係
  - 会計係
  - 用度係
  - 営繕係
  - 勝どき庶務分室庶務係
- 水産土木工学部
  - 開発システム研究室
  - 環境分析研究室
  - 環境改変研究室
  - 漁場水理研究室
  - 漁場施設研究室
  - 漁港水理研究室
  - 漁港施設研究室
- 漁船工学部
  - 船体性能研究室
  - 船体構造研究室
  - 漁船機械研究室
  - 電子機器研究室
  - 音響機器研究室
  - 海洋測器研究室
- 漁業生産工学部
  - 漁具研究室
  - 漁法研究室
  - 漁獲性能研究室
  - 魚群制御研究室
  - たか丸

NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF FISHERIES ENGINEERING

Director General
- Research Planning and Coordination Division
- General Affairs Section
- Aquaculture and Fishing Port Engineering Division
  - Systems Analisis of Aquacultual Ground Section
  - Environment of Fishing and Harvesting Ground Section
  - Improvement of Fishing and Harvesting Ground Section
  - Hydraulics on Aquaculture Section
  - Facilities for Aquaculture Section
  - Hydraulics on Fishing Port Section
  - Facilities for Fishing Port Section
- Fishing Boat and Instrument Division
  - Ship Performance Section
  - Hull Construction Section
  - Engine and Machinery Section
  - Ocean Electronics Section
  - Underwater Acoustics Section
  - Oceanographic Instrument Section
- Fishing Gear and Methods Division
  - Fishing Gear Section
  - Fishing Methods Section
  - Analysis of Gear and Methods Section
  - Fish Behaviour Control Section
  - R. V. Taka-Maru

水産庁水産工学研究所
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF FISHERIES ENGINEERING